

山形大学紀要（農学）第15巻 第1号：11-36，平成18年2月
Bull. Yamagata Univ., Agr. Sci., 15(1): 11-36, Feb. 2006

果 樹 の 立 体 写 真 測 量

山 本 隆 儀・豊 島 紀 子・奥 山 定 治

山形大学農学部生物生産学科農業生産学講座

（平成17年6月30日受理）

Stereo Photogrammetry of Fruit Trees

Takanori YAMAMOTO, Noriko TOYOSHIMA and Sadaharu OKUYAMA

Section of Agricultural Production, Department of Bioproduction, Faculty of Agriculture,

Yamagata University, Tsuruoka, 997-8555, Japan

（Received June 30, 2005）

Summary

By combining size of fruit tree with focal length of lens, plane accuracy and depth accuracy of stereo photogrammetry (SP) were calculated at several resolutions of digital image to examine possibility of measuring fruit trees by SP. As the results, throughout a tree crown of any case, the plane accuracy did not exceed several mm, and the depth accuracy did not several decade mm. A focal length of lens was searched by combining these results with possible photographing horizontal distance in each orchard where each size of fruit trees are planted at its highest density. Following methods were effective for SP; upward photographing using a standard tripod, two sheet pile of net to prevent hail as the back and hand-held type of control point (GCP) set. Orientation succeeded at 100%, when these upward photographs were put in the same coordinate system as aerial photogrammetry. The measurement errors in X and Y coordinates from the simple modeling method were very small. But, calculated values of Z coordinate and the measured values were clearly left from the 1:1 line. As a correction method of the Z coordinates, linear regression equations using the calculated values of the GCP data against the measured ones were effective. In most characters of cherry branches, the calculated values from SP and the measured ones were on their 1:1 lines. For the five cherry trees with different sizes, the measurement errors decreased by the correction method using wide-angle lenses.

Key Words : stereo photogrammetry, fruit trees, tree form, branch form, measurement error

緒 言

高品質多収の果実の安定的生産を目的とした整枝剪定方法および低樹高化や機械化対応などの樹管理方法を実証的に検討するには、樹形に関する情報が必要である。また、樹冠内放射分布の解析には葉量の非ランダム分布データが必要であり、これを計算するための新梢群の三次元座標データが必要である。しかし、多数の枝や高所・密集部位の存在する樹冠内個々の枝の長さ、太さおよび三次元座標の実測には多大な時間と労力を要する（山本・山口、1989）。樹が丸ごと入る三次元グリッドを

設置して、葉量の空間分布を調査する場合、グリッド建設や調査のための労力が甚大になるうえに、樹冠内部の枝を避けるために目の粗いグリッドを用いねばならない。ノギスや巻尺による枝の太さや長さの測定は従来から行われたが（Kikuchi, 1974）、多数の枝の三次元座標を測定することは難しいため枝の三次元座標の計測例は極めて少ない（瀧下ら, 1995）。このため、三次元座標の測定を効率的に行うための機器が考案されてきた。たとえば、一人が小型の反射プリズムを先端に付けた指示棒を枝の節々に当てながら移動し、別の一人が近赤外光セオドライト（経緯儀）を用いて小型プリズムの位置を

キーワード：立体写真測量，果樹，樹形，枝形，測量精度

測量記録する方式が報告されている (Smith ら, 1992). これによると1点の三次元座標の測量に約1分を要し, 測定精度は数 mm 程度であったという. 果樹測量におけるこれよりも効率的な機器の使用については報告されていないが, 建築物内部の寸法測定に使用されている磁力線三次元デジタイザも利用可能なものと思われる. 樹の近くに磁力線三次元デジタイザを置き, この場合は一人で磁力線発生器を枝の節々に当てながら移動し, 三次元座標を自動記録できると思われる. しかし, これらは人間による樹冠内移動測定の枠を出ることができず, 高所・密集部位の測定あるいは枝の詳細な形状把握の場合には計測労力や所要時間が著しく増えるだろう.

上記の現場実測に代わる方法として, なんらかのリモート計測法の開発が望まれる. この中には空中写真 (塩崎ら, 1995), レーザ光式三次元デジタイザ, 直角二側面写真法 (山本・伊藤, 1996) および立体写真測量法が含まれる. 空中写真は推定要素を含まない反面, 撮影が難しく, 数量的データを欠く. レーザ光線の反射をスキャンし, 三角測距の原理で物体表面の三次元座標を計測するレーザ光式三次元デジタイザには, 精度が高いこと, 計測所要時間も極めて短いこと, ポリゴン編集ソフトウェアによる物体の立体的作図が可能などの多くの長所がある. しかし, 市販計器の測定対象のサイズは小さすぎて果樹には向かない. さらに, 枝表面の三次元座標データのみを機械的出力するので, 人間の肉眼観察や判断に頼らざるを得ない枝の境界や枝齢の判断が不可能になるなどの問題が残る. 直角二側面写真法は写真撮影だけが野外作業になり, それ以降はパソコン上の作業になる. 一見, 立体写真測量法に良く似るが, 原理的には全く異なる. 直角二側面写真の撮影が困難な場合が多いことや時代遅れのベン式デジタイザに依存するなどの欠点のほかに, 2枚の写真中の同じ枝を肉眼観察により識別しながら計測するので, 枝が多く, 込み入った樹での計測が困難になる. 本研究で扱う立体写真測量法 (日本写真測量学会・解析写真測量委員会, 1989) はリモート計測の伝統的手法であり, 理論的かつ技術的に最も確立されたものである. しかし, 果樹への応用例はこれまで報告されていない. 立体写真測量法の原理については後述するが, 本研究は果樹の計測に立体写真測量法が使用可能かどうか検討したものであり, 内容的には以下の7部分から構成される. 1) デジタル画像を用いることで生じる平面精度と奥行き精度を果樹のサイズ, レンズ焦

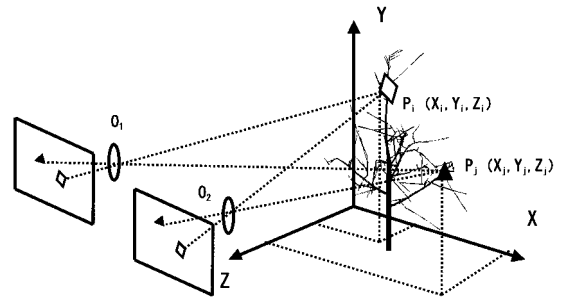


Fig. 1. A simple illustration of the stereo photogrammetry. O_1 and O_2 indicates a left lens and a right one, respectively.

点距離, 画像取り込み解像度などに関連付けて予測すること, 2) 果樹園 (とりわけ密植栽培園) では写真撮影距離を十分大きく取れないことに関連して, 使用レンズ焦点距離の適正な範囲を明らかにすること, 3) 果樹に適した撮影方法, バック設置方法, 基準点の設定方法および標定計算方法を選択すること, 4) 果樹を対象にする立体写真測量の計測誤差, とりわけ奥行き誤差を明らかにし, その簡易補正法を考案すること, 5) 樹の一部 (枝群) の立体写真測量値から算出した枝の形状・姿勢の各項目値と実測値との間の 1:1 性を明らかにすること, 6) 大きさの異なる果樹成木を対象に立体写真測量を実施し, 撮影距離およびレンズ焦点距離の違いが計測誤差や樹形図に及ぼす影響を明らかにすること, および, 7) 果樹を対象にする立体写真測量の実際的方法および注意事項をまとめることである.

材料および方法

緒言に記した目的から見て, 立体写真測量法の原理と工程に最小限触れておく必要がある. 立体写真測量は, カメラを左右にずらしながら同一被写体を撮影した2枚の写真を解析することで (第1図), 撮影条件に関わる未知変量値を推計し, これらを用いて被写体の三次元座標を計算する (日本写真測量学会・解析写真測量委員会, 1989). アナログ写真を用いた立体写真測量には光学測器 (解析図化機など) を必要とするが, 最近, デジタル画像を取り込んだパソコン上でこれを可能にするソフトウェアが開発され, 立体写真測量を身近で行なうことが可能になった. 本報で用いたソフトウェア (アジア航測社, 製品名は“計測名人”, 以下, 本ソフトウェア)

と市販カメラにより立体写真測量を行う場合、最低6個の三次元座標既知の点（以下、基準点あるいは GCP）が両写真に写っている必要がある。パソコンへの画像取り込み（デジタル画像化）後、基準点のほかに両写真にまたがる同一点（バスポイント）や写真4隅の点（指標）を左右写真画像上で正確に計測する。これらの計測値から、レンズ中心の空間座標や3軸に対するカメラの傾きなどの数個の未知変数値を近似計算する（以下、標定または orientation）。この場合の未知変数値の推計には基準点の数だけの観測方程式（非線形方程式）を立て、未知変数の近似値のまわりにテラー展開して線形化する。

さらに、微小修正量を未知変数としたうえで、この観測方程式を最小二乗法にかけて正規方程式を解く。そして、近似値を修正しながら上記計算を収束するまで繰り返す（日本写真測量学会・解析写真測量委員会, 1989）。標定計算が一定の水準で成功したならば、左右の偏位修正画像上で計測点を指定し、三次元座標値（以下、計算値）を出力する。計測点指定方法の主なものにポイント計測とストリング計測がある。前者は左右写真の同一とみなされる1点にマウスカーソルを前後して置き、後者は左写真上の多数の点にマウスカーソルを連続して置いた後に、右写真上で最初の点（あるいは最初と最後の点）

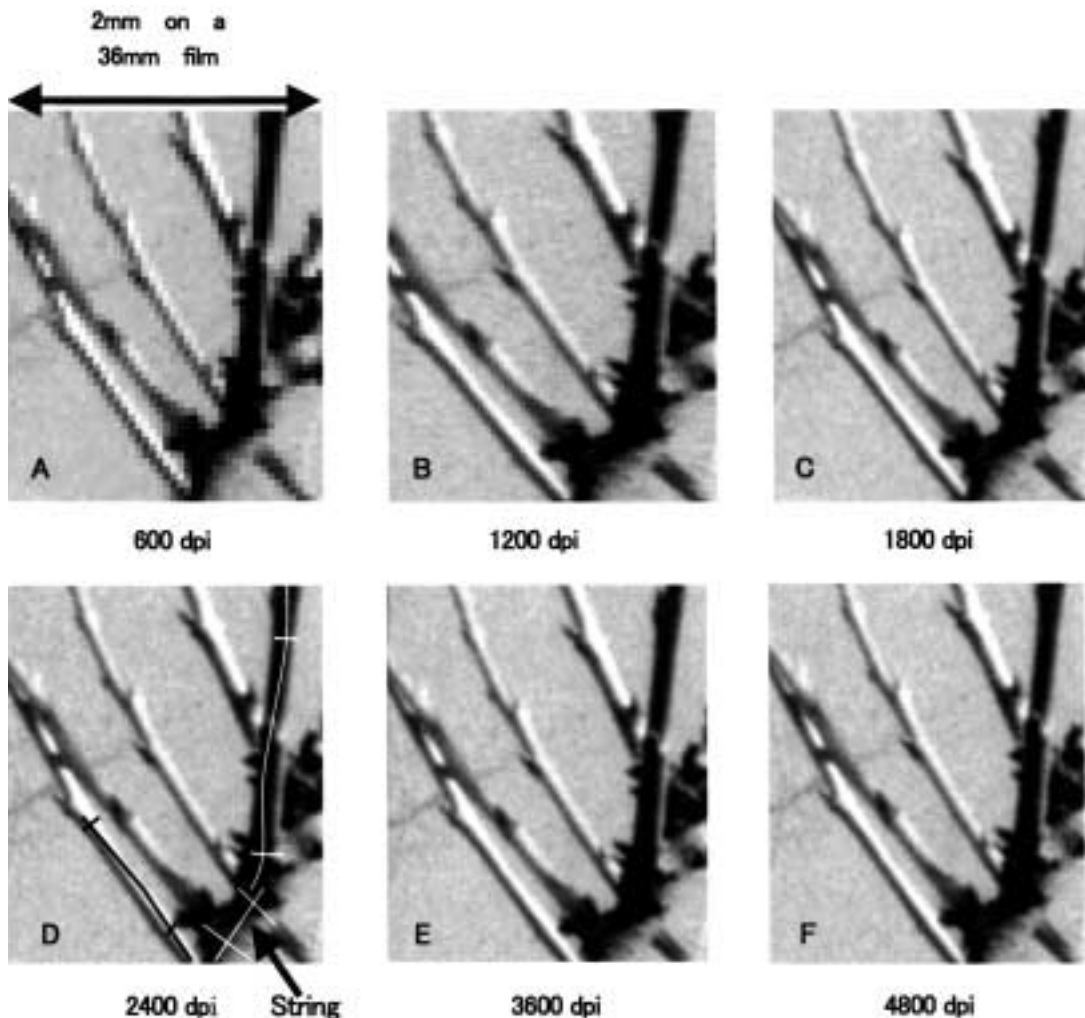


Fig. 2. The effect of difference in the resolution (600-4800 dpi) on a digital image of current shoots which diameter was about 5 mm. The several strings to measure three-dimensional coordinates of the central axis and the diameters were shown in D.

の近傍にマウスカーソルを置くもので、いずれも指定した計測点の三次元座標値を出力する。湾曲した枝の三次元座標の計測にはストリング計測が便利である（第2図D）。

1. 樹体のサイズ，レンズ焦点距離，取り込み解像度および撮影距離を組み合わせときのデジタル画像の平面精度と奥行き精度の試算（実験1）

円柱の高さ（樹高）を最大4mとして、直径（樹幅）が1m, 1.5m, 2m, 2.5m, 3m, 3.5m, 4m, 5mおよび6mとして作られる9段階サイズの円柱を考えた。カメラの高さを135cm, 基線比（＝撮影距離／左右カメラ間距離）を7にしたうえで、円柱の中心点に視準点を決め、焦点距離（FL）が異なる6種のレンズ（FL 8mm 魚眼, FL 18mm 広角, FL 24mm 広角, FL 28mm 広角, FL 35mm 広角およびFL 50mm 標準）を用いて撮影するとき（第3図）、円柱全体を撮影できるときのカメラと円柱中心軸との間の水平距離（撮影距離, photographing horizontal distance, 以下, PHD）を計算した。また、それぞれの写真画像を5段階の取り込み解像度（600 dpi, 1200 dpi, 1800 dpi, 2400 dpi および 3600 dpi）でパソコンに取り込んだとき、カメラとの間の最短距離（Dmin）および最長距離（Dmax）にある円柱内

の点（第3図）のそれぞれの平面精度と奥行き精度を第1式および第2式を用いて計算した。

平面精度

$$= \text{撮影対象までの距離} / \text{レンズ焦点距離}$$

$$\times 1 \text{ 画素の写真解像度} \quad (1)$$

$$\text{奥行き精度} = \text{平面精度} \times \text{基線比} \quad (2)$$

ここで、dpi とはフィルム面1インチを分割する画素数のことである。平面精度は正方形の1画素が有するX軸およびY軸方向の実長であり、奥行き精度は1画素が有するZ軸方向（奥行き方向）の実長である。両式で計算される精度値が小さいほど精度が良いことを意味する。

通常の1眼レフカメラにおけるフィルム1コマの大きさ（24mm×36mm）に被写体を収める場合、高さ（樹高）／直径（樹幅）の比（以下、高幅比）が1より小さいときは横撮り、1より大きいときは縦撮りになる。PHD 近似値を計算するには、高幅比<0.67（横撮り）ではレンズ焦点距離／36mm×樹幅＋樹幅／2の式、高幅比≥1.5（縦撮り）ではレンズ焦点距離／36mm×樹高＋樹幅／2の式を用いれば良い。ここで、樹幅／2の項を加える理由は、密植栽培の樹冠は円柱状よりも直方体状になりやすく、カメラ側に面した直方体前面の幅が被写体の最大幅になっている場合が多いからである。つまり、さらに樹幅／2の距離だけカメラが離れる必要があるためである。ただし、円柱の直径（樹幅）と高さ（樹高）のいずれか大きい方を被写体最大長とし、これを1コマの長辺（36mm）にぎりぎり収めようとしたとき、高幅比が0.67から1.5の範囲では被写体全部を1コマ内に収めることはできない。たとえば、高幅比が0.8の樹の横方向を36mmぎりぎりに写そうとしたとき、樹の縦方向はフィルム縦方向（24mm）をはみ出す。この場合のPHDの計算には、0.67≤高幅比<1のとき（横撮り）はレンズ焦点距離／36mm×樹高×1.5＋樹幅／2の式、1≤高幅比<1.5のとき（縦撮り）はレンズ焦点距離／36mm×樹幅×1.5＋樹幅／2の式を用いれば良い。PHD 近似値とする理由は、立体写真なので左右に少しずらして2枚撮影するための余裕が必要なためである。さらに、撮影が必ずしも水平撮影にはならないためである。つまり、三脚の高さには限界があるので、果樹の場合には、見上げ撮影を余儀なくされる。加えて、上記の計算式に用いるレンズ焦点距離から計算する画角とメーカー公称画角が必ずしも一致しないためである。

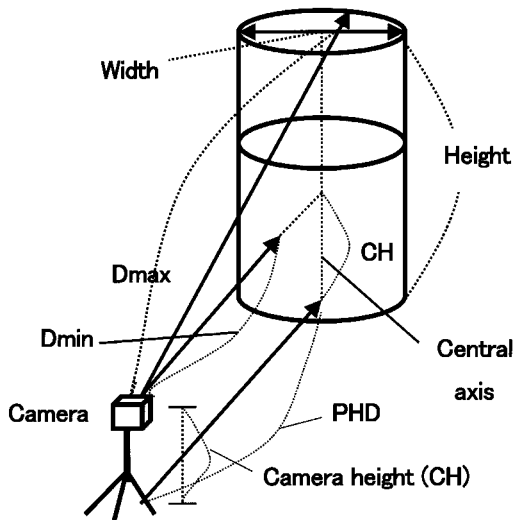


Fig. 3. The explanation of the photographing horizontal distances (PHD), the minimum distance (Dmin) and the maximum distance (Dmax) in a cylinder having a height and a width (diameter) as a fruit tree.

2. 果樹の立体写真測量における撮影方法，バックの設置方法，基準点の設定方法および標定計算方法の検討（実験2）

果樹を対象にする立体写真の撮影方法について，脚立使用の徒手撮影および三脚撮影を検討した．また，バックについては3種のバック資材（発泡ウレタンフォーム板，白寒冷紗および防電網）を用いたときのその設置方法や設置労力を検討した（第4図）．さらに，基準点（GCP）セットについては3種の資材（木材，アルミアングルおよび透明アクリル樹脂製パイプ）による作製方法，設置方法およびこれらの性能について検討した（第4図）．

1. に記した9段階のサイズの樹を並木植え，すなわち，樹間距離（Tree space，TS）には樹幅を用い，これらに数段階の樹列間距離（Row space，RS）の各々を組み合わせて栽植する果樹園を考えた．撮影距離が最も大きく取れる位置は対角線に沿った隣接樹列の樹端付近に

カメラを置く場合である（第5図）．この位置から見上げ撮影したときの PHD を $((\text{樹列間距離} - \text{樹幅} / 2)^2 + (\text{樹幅} / 2)^2)^{0.5}$ の式を用いて計算した．

広義の写真測量における標定方法は多岐にわたるが，2枚以上の写真を用いる立体写真測量には材料および方法の冒頭に記した単モデル法のほかに，複モデル法とバンドル調整法がある．複モデル法は大きな対象を幾つかの区分に分けて左右写真を撮影し，区分間の整合性を保ちながら標定し，対象全体の計測を可能にするものであるが，果樹1本の計測には複モデル法を使用することは稀であろう．第6図Aに示すように，計測対象が平坦でスケールの違いが少ない場合，単モデル法の標定計算でも標定精度は十分確保される．しかし，第6図Bに示すような，計測対象に極端なスケールの違いが存在する場合には，単モデル法では想定している標定精度を確保できない．このような対象を計測するにはバンドル調

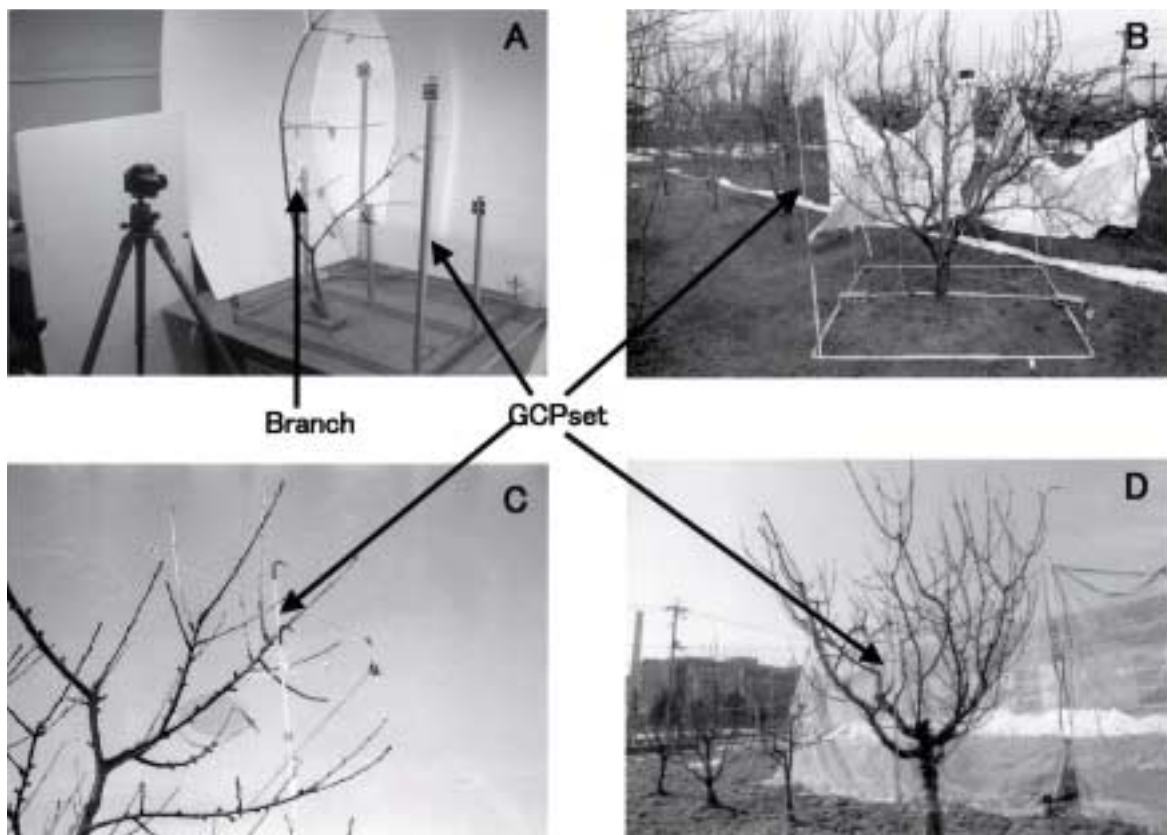


Fig. 4. The photographs of several examples of the control point set (GCP set). A and B were stationary types, and C and D were portable ones. A and D were made of aluminum angles, B was wooden, and C was made of acrylic resin tubes.

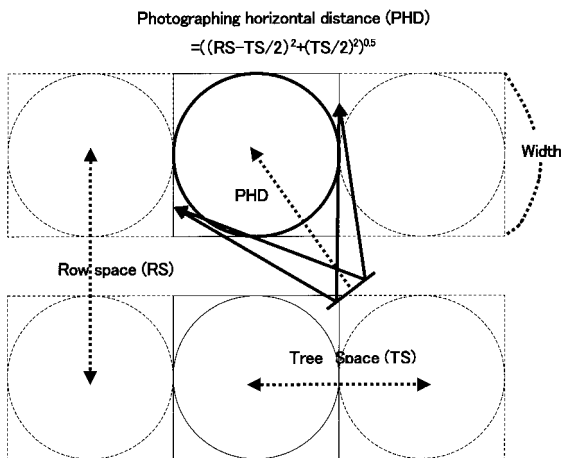


Fig. 5. The relationship between tree space (TS), row space (RS), a tree crown (a circle) and the photographing horizontal distance (PHD shown in Fig. 3) which can be most lengthened.

整法の標定計算が用いられる。バンドル調整法は個々の写真内のバンドル（光束）に対して、そこに含まれる基準点およびバスポイントを用いて未知変量（外部標定要素）を最小二乗法により同時に決定する方法であり、多くの変法があるとともに、単モデル法に比べ、基準点数、データ数（カメラ位置や視準点の三次元座標の近似値を含む）、取り扱う未知数などをはるかに多く要し、近似値が悪いと計算が収束しないことがある（日本写真測量学会・解析写真測量委員会、1989）。本研究では枝群の立体写真測量には単モデル法を用いたが、成木を対象にする立体写真測量ではバンドル調整法の実施も想定して写真撮影を行った。バンドル調整法を実施するには、撮影段階で左右カメラ位置および左右カメラ視準点の三次元座標近似値を事前に入手しておく。このため、撮影の際、2本の2m物差しおよび巻尺を用いてこれらの三次元座標値を計測記録した。

3. 近接撮影における三次元座標および枝の形状・姿勢に関する実測値と計算値の1:1性の検討（実験3）

山形大学農学部実験圃場に栽植されている12年生オウトウ「高砂」の大小様々な太枝（枝齢3～5年生）を落葉後に9本採取し、室内に持ち運び、以下の実験を行った。実験室にアルミアングル製の基準点セット（第4図A）を置き、その中に太枝に着生した全ての枝が入るように太枝をしっかりと固定した。短果枝を除くすべての枝の中央部分に番号を記入した荷札をカメラから数字が見えるように取り付けた。カメラ（オリンパス OM40）に35mmレンズを取り付け、約2mの近距離から基線比を約5として左右写真を撮影した。撮影後直ちにネガフィルムを現像し、フィルムスキャナ（エプソン、FS-1300 Wins）により2400dpiでフィルム画像をパソコンに取りこみ、標定解析を行った。次に、荷札の針金を巻いた部分から錘つき糸を垂らし、糸の長さをY座標値、錘の水平位置をXおよびZ座標値とした。あらかじめ底板には5cm間隔にマス目を書き、物差しを用いて0.1cm精度で水平位置（XとZの座標値）を計測記録した。太枝を含むすべての枝の各々について、荷札番号、枝齢、基部直径、先端部直径、長さ、傾斜角度、方位角度、発生順番、母枝基部からの距離および母枝との分岐角度を測定し、また、曲率半径については以下に示す方法で計算し、記録した。これらの測定結果のいくつかを用いて、

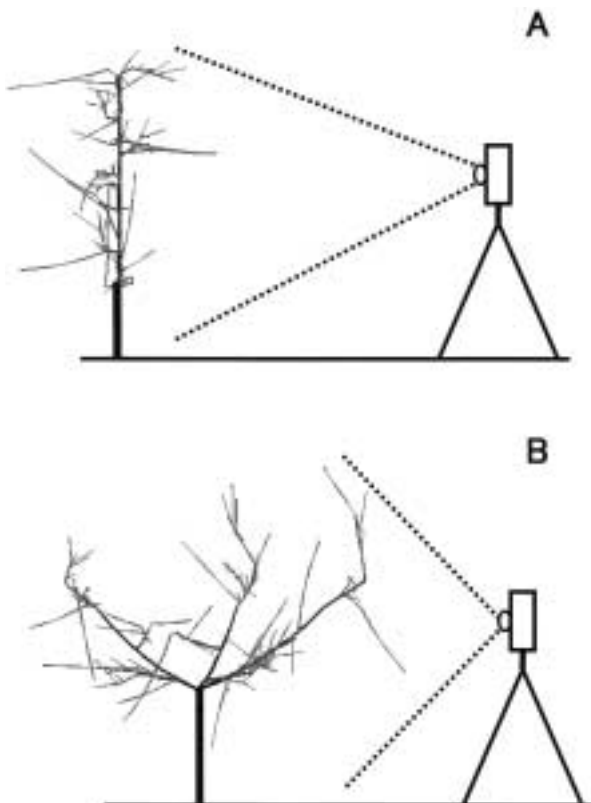


Fig. 6. A subject having uniform scales (A) and that having big change of scales (B)

各枝の体積および太枝上の枝群の総体積を計算した。各枝の基部付近と先端部付近のカメラ方向にほぼ垂直になるところの枝の直径をデジタルノギス（ミットヨ製）により測定し、それぞれ、基部直径および先端部直径とした。先端部直径を計測する際、最先端部の芽を避けて計測した。枝の長さは巻尺で計測し、短果枝の長さはデジタルノギスで計測した。傾斜角度は、錘つき糸を吊るした分度器の底辺を枝の平均的な傾きに平行になるように当て、糸が分度器90度線となす角度を1度刻みで計測した。方位角度は枝の真下に16方位の方向板を置き、カメラ方向を方向板の北方向とし、枝の先端方向の16方位（22.5度刻み）を読み取った。湾曲した枝を弓と見なし、弓の弦に相当するように棒を張り、弓と弦の最大距離（h）を物差しで測定した。これらの測定データを、第3式および第4式（小倉・矢野, 1983）の連立方程式に代入して曲率半径を計算した。

$$h = \text{曲率半径}^2 - (\text{弦の長さ}^2 / 4)^{0.5} \quad (3)$$

$$\text{弦の長さ} = 2(2h \times \text{曲率半径} - h^2)^{0.5} \quad (4)$$

なお短果枝では曲率半径を測定しなかった。母枝との分岐角度は、母枝上の分岐点を真ん中に置き、この点と母枝の先端部および子枝（弧）の中間点の3点がなす角度を分度器で測定した。

上記の計測を全て終了した後、パソコンに取り込んだ左右写真画像を用いて単モデル法で立体写真測量を行った。荷札番号の写った写真を見比べながら、荷札取り付け部分のポイント計測を行った。次に、枝の中心軸の空間座標および基部と先端部の直径のためのストリング計測を行った。印刷した写真を見比べながら、枝齢と荷札番号からストリング名を作成し、枝の中心軸に沿って4点～14点についてストリング計測を行い（第2図D）、引き続き、基部と先端部の直径計測部の各2点についてストリング計測を行った。上記計測を画面内の全ての枝について繰り返した。

ストリング計測のとき、1度に全ての枝を計測すれば、読み取り点のすべてにこれらのデータが貼り付けられる。この場合には、データ量が膨大なため、パソコンの画面移動が遅くなった。そこで、太枝を何回かに分け計測し、その都度データをエクスポートし、その後これらのデータを画面から消した。この場合、ペイント用ウィンドウを別途立ち上げ、この中に同じ写真画像を表示させ、計測済みの枝を色で塗り分けすることで未計測枝を捜すことができた。

エクスポートデータと自作ソフトウェアを用いて各枝の長さ、傾斜角度、方位角度、直径、曲率半径、母枝基部からの距離、分岐角度および枝単位の体積をプログラム計算した。また、グラフィック命令を用いた別の自作ソフトウェアにより太枝全体の枝形図を作図した。

上記の全ての実験項目について、立体写真測量値を用いた計算値と実測値との間の1:1性を吟味した。

太枝実験の他に、もう少し大きい対象として、6年生の‘佐藤錦’の枯れ樹1本（地上部）を室内に搬入し、6ヶ所に基準点を吊るし（第7図D）、焦点距離28mmレンズで、約2.4mの距離から基線比を約7として、左右写真を撮影した。これを用いて1樹全ての枝の中心軸三次元座標および基部と先端部の直径の立体写真測量を行った。また、枝形図の場合とほぼ同等なプログラムを用いては樹形図を作図した。その後、全ての枝について、基部直径、先端部直径および長さを実測し、1樹の総体積を計算した。9本の各太枝の総体積とこの1樹の総体積も含め、枝の総体積の実測値と計算値の1:1性を検討した。

4. 樹全体の立体写真測量における撮影距離およびレンズ焦点距離が樹形の計測結果に及ぼす影響（実験4）

実験圃場栽植のオウトウ‘佐藤錦’の12年生樹（第7図G）および16年生樹（第7図J）を焦点距離28mmレンズで約6mの距離から基線比を約7として左右写真を撮影した。この場合は脚立に登り徒手撮影を行った。この写真を用いて、単モデル法により、上記同様な立体写真測量を行い、樹形図を作成した。また、大小異なる5本の樹（‘佐藤錦’3本と‘高砂’2本）を用いて（第8図A～E）、三脚を用いた見上げ撮影を行った。この撮影では、樹のサイズに対応した大小2種類の、現場で組み立て可能なアルミアングル製基準点セットを各樹のほぼ中心部に垂直に立てた（第8図A～E）。焦点距離8mmの魚眼レンズ（第8図F）および焦点距離18mm、24mm、28mmおよび35mmの4種の広角レンズを用い、それぞれの画角で基準点セットを含む1樹全体をフィルム内に写すことのできる最短距離（PHD）から左右写真を撮影した（合計25組）。ただし、第8図Cに示したC樹の28mmレンズの写真については現像が失敗したので合計24組の左右写真を入手した。バンドル調整の可能性を試すために、基準点座標の原点（0, 0, 0）から

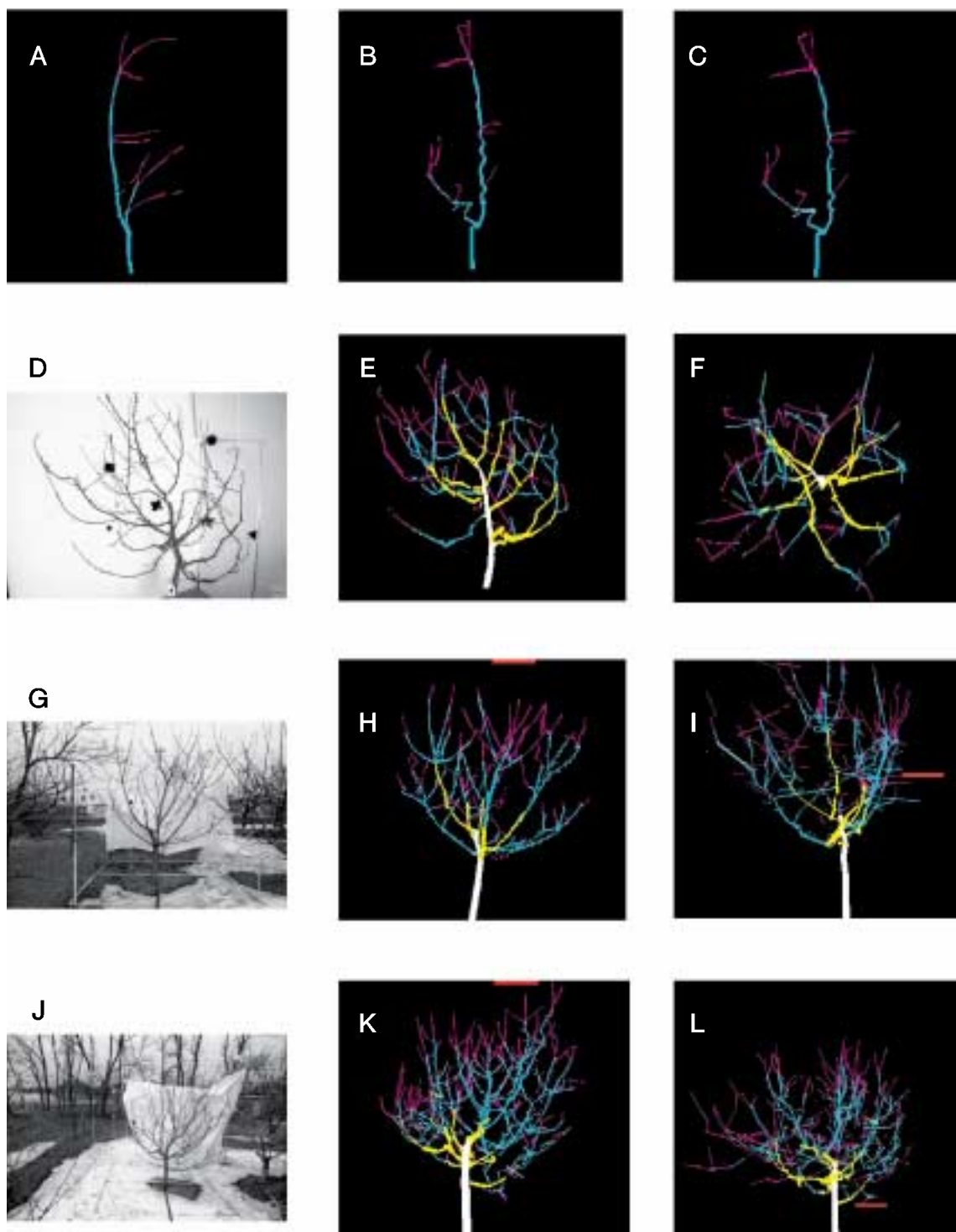


Fig. 7. Branches figures and tree form figures from the stereo photogrammetry. A, B and C is the front view, the side view from the simple model method and that using corrected Z-value from the stereo photogrammetry value in Experiment 3, respectively. E and F is the front view and the top view from the indoor stereo photogrammetry value of a 6-year-old tree(D), respectively. H and I is the front view and the side view from a 12-year-old tree (G) respectively. K and L is the front view and the side view from a 16-year-old tree(J) respectively. A horizontal red bar (in H-L) indicates 50 cm.

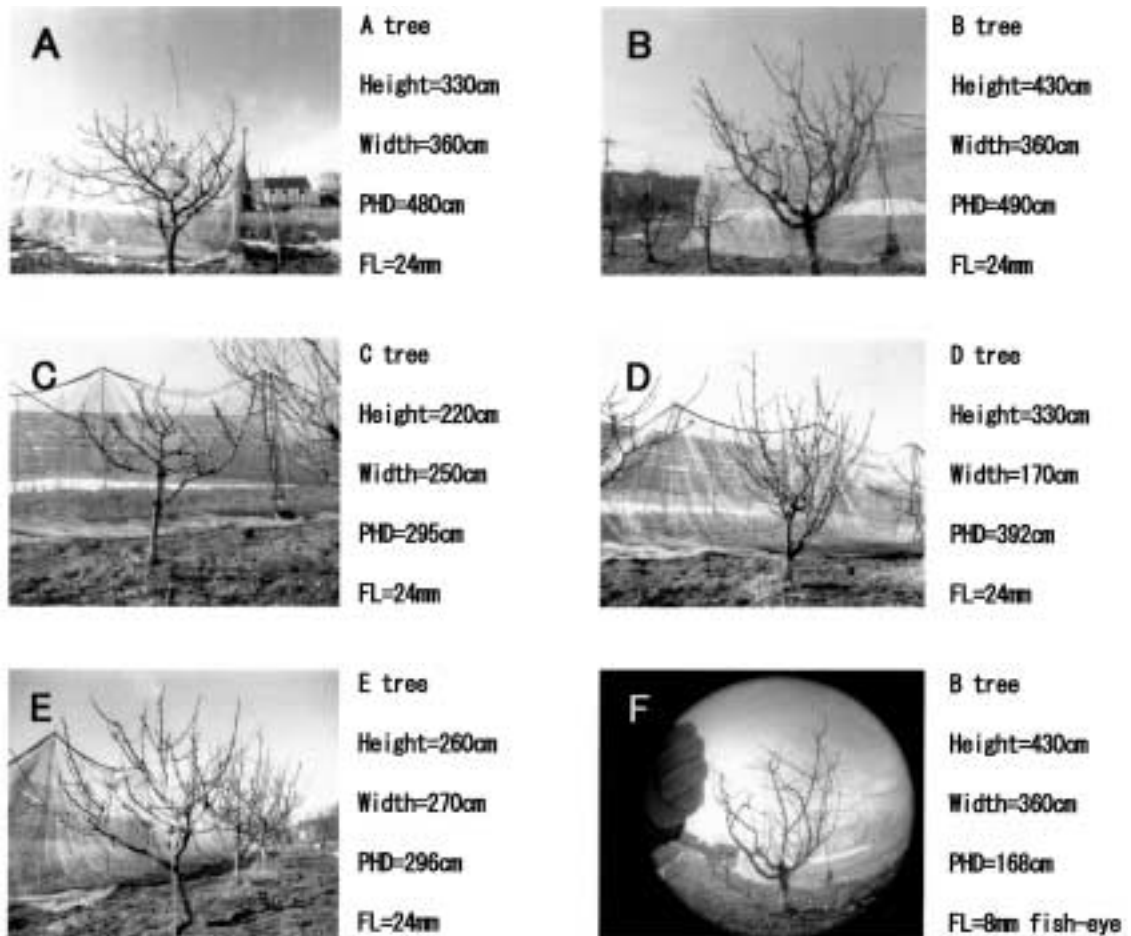


Fig. 8. The photographs of the five trees in Experiment 5 (A-D). F is the photograph of the B tree by a fisheye lens.

測ったカメラ位置と視準点位置の三次元座標を撮影ごと測定した。標定計算の手法として、単モデル法のみ、単モデル法に簡易補正法を加味した方法（結果および考察を参照）およびバンドル調整法を試みた。

結果および考察

1. 樹体のサイズ，レンズ焦点距離，取り込み解像度および撮影距離を組み合わせたときのデジタル画像の平面精度と奥行き精度

樹体のサイズ，レンズ焦点距離および撮影距離を組み合わせたときの平面精度と奥行き精度の試算結果（実験1）を取り込み解像度が2400 dpiのときに限り第1表に示した。ただし，この場合の精度とは標定解析が理想

的に行われた場合の精度（理論的上限值）のことであり，未知変量に関する種々の推定誤差を含んだときの誤差ではない。両精度とも，レンズの焦点距離が大きいほど，撮影距離が小さいほどおよび取り込み解像度が大きいほど向上する（第1式および第2式）。第1表の精度は2400 dpiの場合であるが，600 dpiではこれらの4倍，1200 dpiでは2倍，1800 dpiでは1.34倍，3600 dpiでは0.67倍になる。このことは，同一のアナログ写真を種々の解像度でパソコンに取り込んだ場合のデジタル画像を見比べてもおおよそわかる（第2図）。また，第1表では，基線比が標準的な値である7に固定したが，基線比が小さいほど奥行き精度は向上する（第2式）。とはいえ，基線比を幾らでも小さくできるものではない。基線比が小さすぎると樹全体を1組の左右写真として撮影するこ

Table 1. The theoretical accuracies of XY plane and depth (Z) at the nearest and the farrest points in the digital images (2400 dpi) of several sizes of cylinders which could be photographed using the six lenses with different focal length and at the shortest photographing distance (PHD). The camera height was 135 cm and the base line ratio (= PHD/Distance between the two cameras) was 7. These photographing distances (Dmin, Dmax and PHD) were illustrated in Fig. 3.

Focal length of lens (mm)	Cylinder size			Shape of photo-graph	Photographing distance			Nearest point		Farrest point	
	Width (m)	Height (m)	Height/Width		PHD (m)	Dmin (m)	Dmax (m)	Accuracy of XY plane (mm)	Accuracy of depth (Z) (mm)	Accuracy of XY plane (mm)	Accuracy of depth (Z) (mm)
8	6	4	0.67	L ^z	4.33	1.33	7.80	1.76	12.35	10.32	72.21
18	6	4	0.67	L	6.00	3.00	9.38	1.76	12.35	5.52	38.61
24	6	4	0.67	L	7.00	4.00	10.35	1.76	12.35	4.56	31.93
28	6	4	0.67	L	7.67	4.67	10.99	1.76	12.35	4.15	29.08
35	6	4	0.67	L	8.83	5.83	12.13	1.76	12.35	3.67	25.67
50	6	4	0.67	L	11.33	8.33	14.58	1.76	12.35	3.09	21.60
8	5	4	0.80	L	3.83	1.33	6.87	1.76	12.35	9.08	63.58
18	5	4	0.80	L	5.50	3.00	8.43	1.76	12.35	4.96	34.69
24	5	4	0.80	L	6.50	4.00	9.38	1.76	12.35	4.14	28.96
28	5	4	0.80	L	7.17	4.67	10.02	1.76	12.35	3.79	26.52
35	5	4	0.80	L	8.33	5.83	11.15	1.76	12.35	3.37	23.61
50	5	4	0.80	L	10.83	8.33	13.59	1.76	12.35	2.88	20.14
8	4	4	1.00	L	3.33	1.33	5.96	1.76	12.35	7.88	55.15
18	4	4	1.00	L	5.00	3.00	7.48	1.76	12.35	4.40	30.81
24	4	4	1.00	L	6.00	4.00	8.43	1.76	12.35	3.72	26.01
28	4	4	1.00	L	6.67	4.67	9.06	1.76	12.35	3.43	23.98
35	4	4	1.00	L	7.83	5.83	10.18	1.76	12.35	3.08	21.56
50	4	4	1.00	L	10.33	8.33	12.61	1.76	12.35	2.67	18.69
8	3.5	4	1.14	U ^y	2.92	1.17	5.37	1.54	10.80	7.10	49.70
18	3.5	4	1.14	U	4.38	2.63	6.67	1.54	10.80	3.92	27.47
24	3.5	4	1.14	U	5.25	3.50	7.48	1.54	10.80	3.30	23.10
28	3.6	4	1.14	U	5.83	4.08	8.03	1.54	10.80	3.04	21.25
35	3.5	4	1.14	U	6.85	5.10	9.00	1.54	10.80	2.72	19.06
50	3.5	4	1.14	U	9.04	7.29	11.11	1.54	10.80	2.35	16.46
8	3	3.5	1.17	U	2.50	1.00	4.54	1.32	9.26	6.01	42.05
18	3	3.5	1.17	U	3.75	2.25	5.67	1.32	9.26	3.34	23.35
24	3	3.5	1.17	U	4.50	3.00	6.37	1.32	9.26	2.81	19.67
28	3	3.5	1.17	U	5.00	3.50	6.85	1.32	9.26	2.59	18.11
35	3	3.5	1.17	U	5.88	4.38	7.68	1.32	9.26	2.32	16.26
50	3	3.5	1.17	U	7.75	6.25	9.50	1.32	9.26	2.01	14.07
8	2.5	3.5	1.40	U	2.08	0.83	3.97	1.10	7.72	5.25	36.73
18	2.5	3.5	1.40	U	3.13	1.88	4.87	1.10	7.72	2.87	20.06
24	2.5	3.5	1.40	U	3.75	2.50	5.44	1.10	7.72	2.40	16.80
28	2.5	3.5	1.40	U	4.17	2.92	5.83	1.10	7.72	2.20	15.42
35	2.5	3.5	1.40	U	4.90	3.65	6.51	1.10	7.72	1.97	13.78
50	2.5	3.5	1.40	U	6.46	5.21	8.00	1.10	7.72	1.69	11.86
8	2	3.5	1.75	U	1.78	0.78	3.51	1.03	7.20	4.65	32.53
18	2	3.5	1.75	U	2.75	1.75	4.32	1.03	7.20	2.54	17.79
24	2	3.5	1.75	U	3.33	2.33	4.84	1.03	7.20	2.13	14.93
28	2	3.5	1.75	U	3.72	2.72	5.19	1.03	7.20	1.96	13.73
35	2	3.5	1.75	U	4.40	3.40	5.81	1.03	7.20	1.76	12.31
50	2	3.5	1.75	U	5.86	4.86	7.19	1.03	7.20	1.52	10.65
8	1.5	3	2.00	U	1.42	0.67	2.72	0.88	6.17	3.60	25.22
18	1.5	3	2.00	U	2.25	1.50	3.42	0.88	6.17	2.01	14.09
24	1.5	3	2.00	U	2.75	2.00	3.87	0.88	6.17	1.71	11.94
28	1.5	3	2.00	U	3.08	2.33	4.17	0.88	6.17	1.58	11.04
35	1.5	3	2.00	U	3.67	2.92	4.71	0.88	6.17	1.43	9.98
50	1.5	3	2.00	U	4.92	4.17	5.90	0.88	6.17	1.25	8.74
8	1	2.5	2.50	U	1.06	0.56	1.93	0.73	5.14	2.56	17.91
18	1	2.5	2.50	U	1.75	1.25	2.53	0.73	5.14	1.49	10.40
24	1	2.5	2.50	U	2.17	1.67	2.90	0.73	5.14	1.28	8.96
28	1	2.5	2.50	U	2.44	1.94	3.16	0.73	5.14	1.19	8.36
35	1	2.5	2.50	U	2.93	2.43	3.62	0.73	5.14	1.09	7.66
50	1	2.5	2.50	U	3.97	3.47	4.62	0.73	5.14	0.98	6.84

^z Landscape.

^y Upright.

とが困難になる。

レンズから測った最近点から最遠点までの範囲にわたり、平面精度は数 mm 程度であり、奥行き精度は悪くても数十 mm であった（第 1 表）。標定計算工程に含まれる独自の誤差の問題を別にすれば、上記精度が枝中心軸曲線の三次元座標系列を用いて表現する枝形や樹形に及ぼす影響は極めて小さいものと考えられる。周知のごとく、枝中心軸の三次元座標を実測することは極めて困難であり、仮に実測してもこれより大きい誤差を含むことは疑いない。葉量の三次元分布の求め方の一つとして、新梢長を用いた着葉数の推定式、新梢中心軸の三次元座標データおよび仮想グリッド法（パソコン内で網目の大きさを自由に設定できるグリッド）の 3 者を組み合わせる方法が提案されている（山本ら，2004）。この場合にも上記の新梢中心軸座標の精度が葉量の空間分布の誤差源になることは否定できない。ただし、設置型三次元グ

リッド法を用いて葉量の三次元分布を実測するとき、グリッドを構成する 1 辺の長さが数十 cm（25 cm 程度が最小限界で、たいていは 30 cm～50 cm）の立方体内部の葉数を数えるので、この場合の葉量の三次元分布の誤差に比べれば、上記の精度からもたらされる誤差は極めて小さいものと考えられる。樹形や樹冠形に対する 1 枝 1 葉の位置が僅かにずれることの影響はほとんど無いからである。

一方、レンズ焦点距離、撮影距離および取り込み解像度によっては、カメラから遠いところにある枝の奥行き精度（Z 座標値の精度）が数十 mm にも達するものもある（第 1 表）。これが枝の直径計算に及ぼす影響は無視できない。枝の直径は枝形図、樹形図および枝体積計算の要素になる。とりわけ、直径計測部位の両端点の三次元座標（ X_1, Y_1, Z_1 および X_2, Y_2, Z_2 ）を用いて計算すると（第 3 式）、Z 座標値を含むため相当大きい

Table 2. Relationships between the photographing horizontal distance (PHD), the tree space (TS), the row space (RS), the width of orchard road (WOR) and the occupied area (%)

TS (m)	WOR (m)	RS (m)	PHD (m)	% of area	TS (m)	WOR (m)	RS (m)	PHD (m)	% of area
6	4	10	7.62	47.10	2.5	1.5	4	3.02	49.06
6	5	11	8.54	42.82	2.5	2	4.5	3.48	43.61
6	6	12	9.49	<u>39.25</u>	2.5	2.5	5	3.95	<u>39.25</u>
6	7	13	10.44	36.23	2.5	3	5.5	4.43	35.68
6	8	14	11.40	33.64	2.5	4	6.5	5.40	30.19
5	3	8	6.04	49.06	2	1	3	2.24	52.33
5	4	9	6.96	43.61	2	1.5	3.5	2.69	44.86
5	5	10	7.91	<u>39.25</u>	2	2	4	3.16	<u>39.25</u>
5	6	11	8.86	35.68	2	2.5	4.5	3.64	34.89
5	7	12	9.82	32.71	2	3	5	4.12	31.40
4	2.5	6.5	4.92	48.31	1.5	0.5	2	1.46	58.88
4	3	7	5.39	44.86	1.5	1	2.5	1.90	47.10
4	4	8	6.32	<u>39.25</u>	1.5	1.5	3	2.37	<u>39.25</u>
4	5	9	7.28	34.89	1.5	2	3.5	2.85	33.64
4	6	10	8.25	31.40	1.5	2.5	4	3.34	29.44
3.5	2.5	6	4.60	45.79	1	0.5	1.5	1.12	52.33
3.5	3	6.5	5.06	42.27	1	1	2	1.58	<u>39.25</u>
3.5	3.5	7	5.53	<u>39.25</u>	1	1.5	2.5	2.06	31.40
3.5	4	7.5	6.01	36.63	1	2	3	2.55	26.17
3.5	5	8.5	6.97	32.32	1	2.5	3.5	3.04	22.43
3	2	5	3.81	47.10	0.5	0.5	1	0.79	<u>39.25</u>
3	2.5	5.5	4.27	42.82	0.5	1	1.5	1.27	26.17
3	3	6	4.74	<u>39.25</u>	0.5	1.5	2	1.77	19.63
3	3.5	6.5	5.22	36.23	0.5	2	2.5	2.26	15.70
3	4	7	5.70	33.64	0.5	2.5	3	2.76	13.08

誤差を伴う。この場合の対処法は、カメラから遠い所でも良好な平面精度を有する(第1表) X座標値とY座標値を用いて計算するみかけの直径(第4式)の使用である。

真の直径＝

$$((X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2)^{0.5} \quad (3)$$

みかけの直径＝

$$((X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2)^{0.5} \quad (4)$$

新梢の太さは樹種によって異なるが、最も細くても5 mm程度である。取り込み解像度を上げることができれば、直径計測部の端点にマウスカーソルをほぼ正しく当てることが可能である(第2図D)。ただし、これも標定計算が理想的に行われた場合を前提にしたもので、諸般の事情により標定計算に伴う誤差が増大したときには、次善の策として、新梢に限り直径を実測し、その代表値を樹形図作図や枝体積計算に用いる。新梢中心軸の三次元座標系列を測量する場合には上記の困難は存在しない。なぜならば、精度が低くても写真から枝の印影が消えることはない(たとえば、第2図A)。厳密には中心軸とは言えないが、枝に沿った三次元座標系列を読み取ることができる。新梢より枝齢の高い枝や近距離から撮影したときには、上記の問題はほとんど解消する。

第1表の試算結果は広場の独立樹のように撮影距離を自由にとれることを前提にしている。しかし、撮影距離が十分取れない密植栽培では、焦点距離の短いレンズの使用が不可欠である。そこで、種々なサイズの樹を並木植えとして、数段階の樹列間距離を組み合わせたときの撮影可能距離を第1表と関連付けて比較した(第2表)。わい性樹を用いた最密植クラスの栽植距離として4 m×2 m 植えがある。わが国ではこれよりも密植のケースが見当たらないのは、4 m×2 m 植えよりもさらに密植した場合には光環境や農作業上の問題が発生するからであろう。この4 m×2 m 植えに限らず、樹列間距離が樹間距離の2倍になるとき、樹冠面積率(＝円柱断面積/(樹列間距離×樹間距離)×100%)はいずれも39.25%に等しい(第2表の下線を参照)。そこで、39.25%の樹冠面積率を限界値(判断基準)として考え、第2表に示す撮影水平距離(PHD)よりも小さい撮影水平距離(PHD)が得られるレンズの焦点距離をそれぞれの樹サイズについて第1表から拾い上げた。その結果、撮影可能なレンズ焦点距離として以下のものがあげられる。12 m×6 m 植えで樹高が4 mでは35 mm レンズ横撮り、10 m×5

m 植えで樹高が4 mでは28 mm レンズ横撮り、8 m×4 m 植えで樹高が4 mでは24 mm レンズ横撮り、7 m×3.5 m 植えで樹高が4 m、6 m×3 m 植えで樹高が3.5 m および5 m×2.5 m 植えで樹高が3.5 m ではいずれも24 mm レンズで縦撮り、4 m×2 m 植えで樹高3.5 m および3 m×1.5 m 植えで樹高が3 mでは18 mm レンズで縦撮り、2 m×1 m 植えで樹高が2.5 mでは8 mm レンズで縦撮りであった(第1表)。上記は樹冠面積率が39.25%に等しい高密植の場合であって、これよりも低密植では上記より焦点距離の長いレンズを選ぶことができる。ただし、第1表内下部に示す樹幅が1.5 m以下の範囲で、樹高が2.5～3 mで、しかも、樹間距離：樹列間距離＝1：2(樹冠面積率＝39.25%)とする並木植え(第2表の右下部分)は通常考えられない。むしろ、第2表のこの部分は、樹間距離や樹列間距離をもっと大きく取ったときの幼木時代の立体写真撮影に対応したものであるとして記した。すなわち、第2表の樹冠面積率が39.25%よりずっと低いときを判断基準として、第1表から撮影距離を選択すべきである。この場合は35 mmあるいは50 mm レンズでも十分撮影できる(第2表)。また、第1表の縦撮りの多くは樹高が3～4 mのような樹高限界値を用いた場合であって、樹高がこれよりも小さければ、撮影距離は小さくなり、上記より長い焦点距離のレンズの使用が可能である。

2. 果樹の立体写真測量に適する立体写真撮影、バックおよび基準点セット

一般に広域測量には遠距離からの空中撮影、地面起伏などの土木用測量には三脚を使用した見下ろし地上撮影が普通である。果樹個体を写真内に大きく写す近距離空中撮影(第9図A)にはリモコン式ヘリコプターを使用できるが(塩崎ら, 1995)、立体写真測量用の左右写真を撮影することは不可能に近い。三脚を用いた近距離見下ろし撮影を行いたくても、果樹の背丈に合う高い三脚は入手しがたい。三脚の代わりとして脚立を用いた見下ろし徒手撮影(第9図B)では、撮影誤差が甚大になり、標定精度が低下することが多かった。したがって、標準三脚を使用した見上げ撮影(第9図C)および樹高の半分くらいの高三脚による水平撮影(第9図D)が実際的である。しかし、後者の場合の高所でファインダを覗く不都合を考えると、標準三脚を使用した見上げ撮影(第9図C)が最も容易である。樹全体と違って、一部の枝

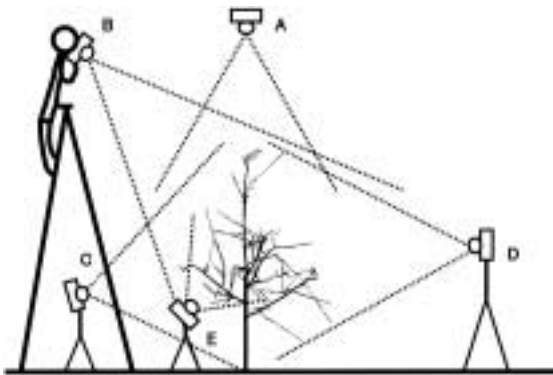


Fig. 9. Photographing methods in stereo photogrammetry for a fruit tree.

群だけを対象にするときには撮影距離を大幅に短縮できた。この場合には見上げ撮影（第9図E）になるが、空をバックにできる利点がある。

枝群の立体写真測量のときでも、水平撮影にはバックを必要とする。樹全体の立体写真の撮影では、暗い地面や隣接樹の枝が重なって写るのでなんらかのバックの設置が必要である。バック資材として、対象が小さい場合、発泡ウレタンフォーム板や白寒紗が適したが、樹まるごとの測量にはこれらの市販資材の面積規格は不向きであった（第4図B）。また、風圧の影響も無視できないので薦められない。面積規格の大きい果樹用防電網を2枚重ねにし、樹の後ろ側に張ったり（第4図D）、密植園では樹の後ろ側半分を包むように設置するのが良かった。フックを取り付けたエレクトパイプを数本立て、防電網の金穴に通したヒモで吊るすが、軽量のため設置労力は少なかった。また、防電網の網目は大きいので風圧に耐えた。また、2枚重ねにすることで、撮影された写真は隣接樹の枝の印影を十分カットできたから、パソコン画面での計測も可能であった。

果樹の立体写真測量における基準点の必要条件は三次元座標既知の最少6個の標識が被写体（樹あるいは枝群）のサイズに対応した空間内に適度に分散していることである。加えて、標識自体の三次元座標を正確に測定できるもの、持ち運びが容易であることおよび風による揺れが無いものが望ましい。なお、基準点セットの中央部分にもう1個の標識を追加すれば（合計7個）、これを視準点としてカメラ焦点合わせに使用することで、カメラの距離リングからおおよその撮影距離を読み取ることができる。また、6個の基準点の一つが左右写真のいずれ

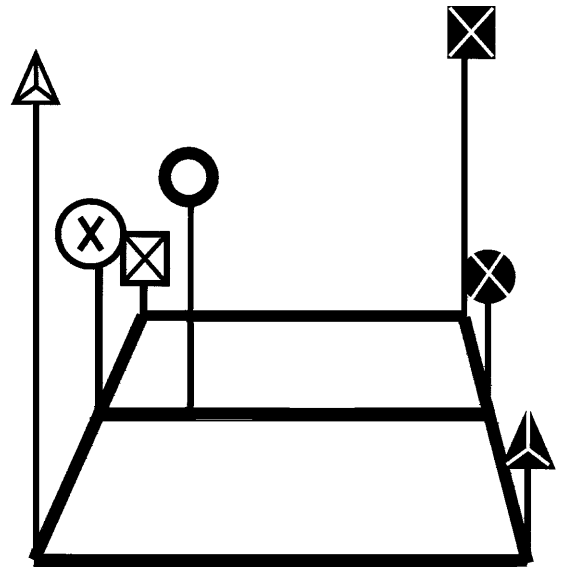


Fig. 10. A schema of the stationary type GCP set.

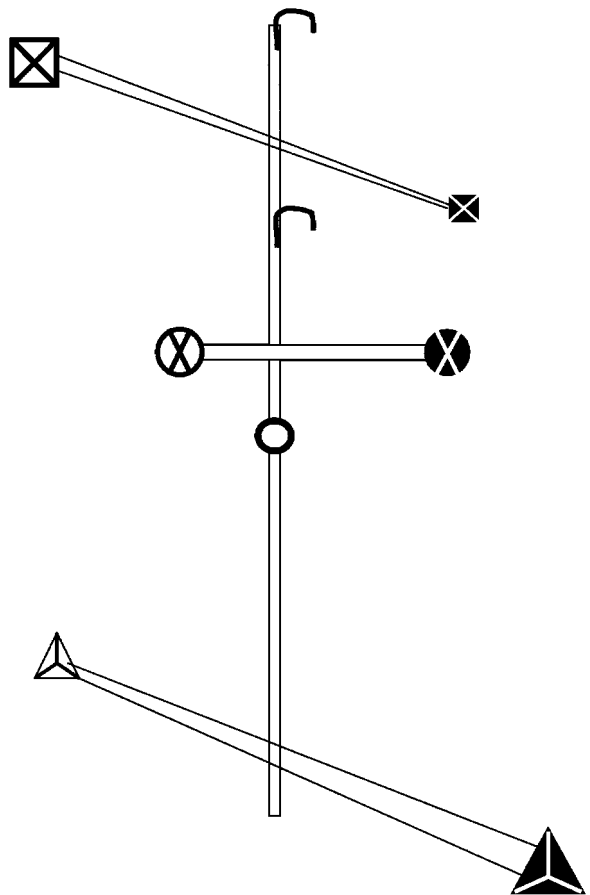


Fig. 11. A schema of the portable type GCP set.

かで死角に入った場合に予備の基準点としても使える。

これまでの筆者らの試行錯誤の結果、「日」の字の形をした基底軸の数箇所から長さの異なるポールが垂直に立つように組み立てるもの(以下、日の字型、第10図)および1本の垂直中心軸の数箇所に長さの異なる水平棒を異なる角度で放射状に組み立てるもの(以下、単軸型、第11図)が使用可能であった。日の字型の資材として木材やアルミアングル、単軸型の資材として透明アクリル棒やアルミアングルを用いた。資材どうしの結合・固定にはボルトとナットを用い、強度を増すために必要に応じてかすがいを取り付けた。これらの幾つかの設置風景写真を第4図に示した。第4図AおよびBは日の字型で、Aは室内用アルミアングル製、Bは樹体用木製であった。第4図CおよびDは単軸型で、Cは枝群用透明アクリル棒製で枝に吊るすもの、Dは樹体用アルミアングル製で、主幹部にひもで縛って固定するものであった。ただし、いずれの基準点セットも背が高くなると冬季の風圧を受けて揺れる場合があり、更に強固な資材を用いて作製するか、できるだけ風の弱い日を選んで撮影する必要があった。また、日の字型と単軸型を比較した場合、設置のための労力は後者が格段に少なかったが、風圧による揺れも大きかった。

3. 近接撮影における三次元座標の実測値と計算値の1:1性

9本の太枝を用いた立体写真測量(実験3)における単モデル法からのX座標およびY座標の計算値と実測値は1:1線上に分布したことから(第12図AおよびB)、単モデル法の場合でも、X座標とY座標の計測は非常に正確であると言える。しかし、Z座標には大きな誤差が

見られた(第12図C)。この原因の一つとして、1.に記した立体写真測量法に不可避の奥行誤差、すなわち、平面誤差の基線比倍(この場合、5倍)になるからである。これに加え、第12図CにはZ座標の計算値と実測値の間の1:1性が明らかに成立せず、奥行き幅が実際より狭く計算された。これは、近接撮影(この場合、撮影距離は約2m)で、かつ、被写体にスケールの大きな変化が存在するときに、単モデル法のみで標定計算すれば奥行き計測に1:1性が成立せず、大きい誤差が生ずることを示唆する。したがって、なんらかの補正法が必要である。

4. 枝の形状・姿勢の項目値に関する実測値と計算値の1:1性

9本の太枝(実験3)の単モデル法立体写真測量値を用いて算出した枝の形状・姿勢に関する各項目の計算値と実測値の関係を第13図に示した。また平均誤差を第3表に示した。基部直径および先端部直径の計算値と実測値はおおよそ1:1線上に分布したが、太い枝と同様に細い枝にも同規模の誤差が見られた(第13図AとB)。この原因として実測部位と立体写真測量におけるパソコン画面での計測部位が厳密に同じにできなかったことおよび実測の際のノギスによる測定と立体写真測量の際のマウスによる測定の違いが考えられる。枝の長さ、母枝基部からの距離および枝体積についても計算値と実測値は1:1線上に分布した(第13図C、GおよびI)。方位角度の平均誤差は大きくなったものの、1:1性が推察された(第13図E)。方位角度の実測は16方位板を用いたため、22.5度刻みの測定値になり、実測値に大きなばらつきを伴ったものと思われる。傾斜角度と分岐角度

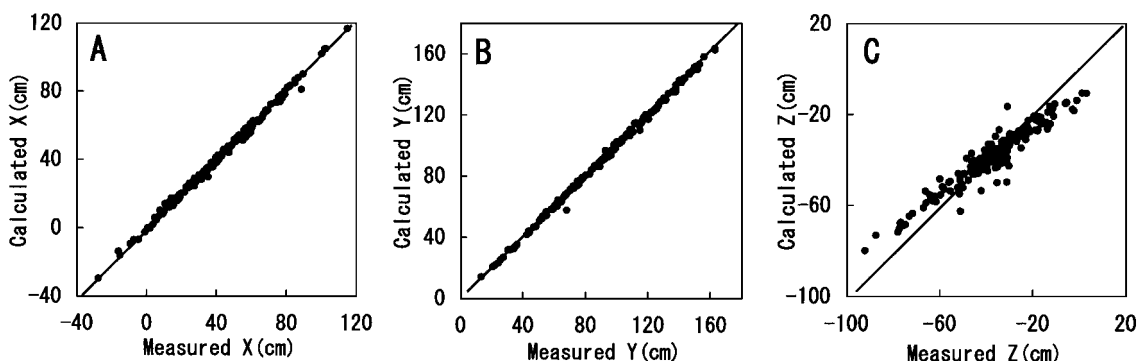


Fig. 12. Relations between the calculated values and the measured of X coordinates(A), Y coordinates(B) and Z coordinates(C), respectively.

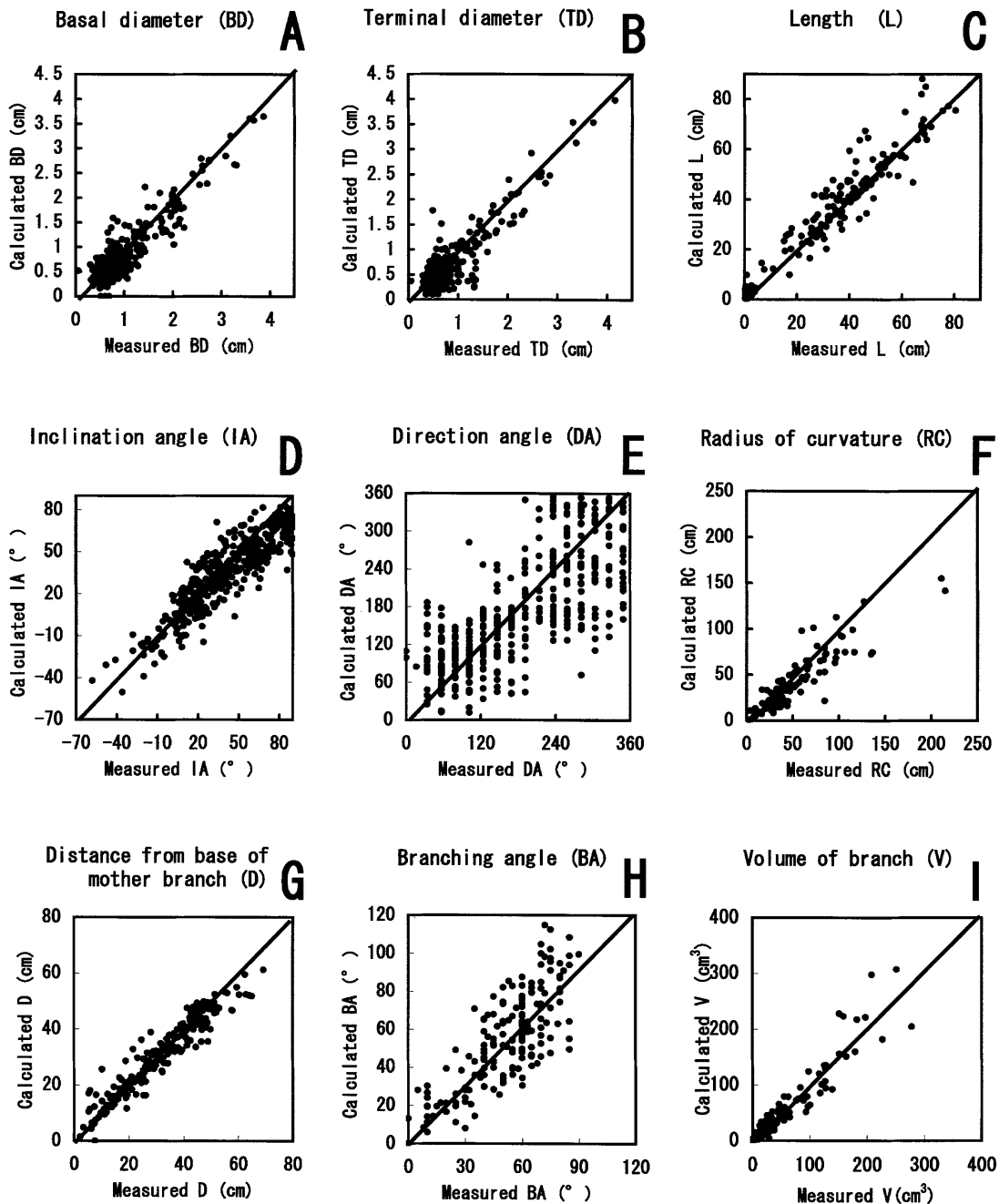


Fig. 13. Relations between the calculated values and the measured values of the several items of the branch characters in Experiment 3.

にも計算値と実測値の間にほぼ 1 : 1 性が推察されたが (第13図DおよびH), これらの誤差は直径や長さよりも大きかった。この原因として、太く、湾曲した枝に小さい分度器を当てるので、傾斜角度や分岐角度を正確に

測定し難く、誤差が大きくなったことが考えられる。この他、枝群単位の総体積の実測値と計算値の 1 : 1 性もほぼ良好であった (第14図)。

上記の項目値全般にわたり、3. に記した奥行き誤差

Table 3. The mean error between the measured value and the calculated value of the each item in Experiment 3.

Items	Unit	Mean error	SD ^z	n
X coordinate	cm	1.182	1.01	188
Y coordinate	cm	0.877	1.054	188
Z coordinate	cm	5.037	3.802	188
Basal diameter	cm	0.201	0.169	376
Terminal diameter	cm	0.203	0.181	434
Length	cm	2.263	3.535	405
Inclination angle	°	11.47	8.969	405
Direction angle	°	53.54	42.58	401
Radius of curvature	cm	14.61	15.29	116
Distance from base of its mother branch	cm	3.463	3.213	206
Branching angle	°	12.79	9.466	170
Volume of branch	cm ³	4.194	10.25	420

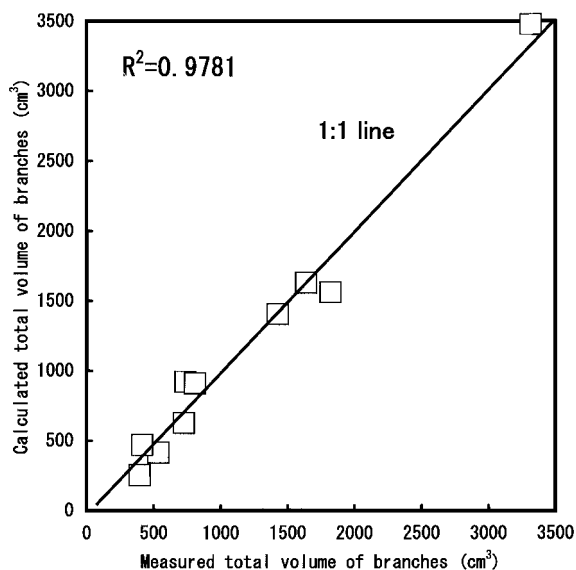
^z Standard deviation of error.

Fig. 14. Relations between the calculated values and the measured values of total volume of branches.

およびZ座標値の1:1性の悪いことが何らかの影響を及ぼしたことが考えられる。また、計算過程にZ座標値が用いられないものとして直径があり、さらに、枝単位の計測のため、Z座標値が互いに似ていることもあって、項目によっては、上記の奥行き誤差の影響が現われにくいことが考えられる。

5. 単モデル法における奥行き誤差の簡易補正法

3. に記したように、奥行きの1:1性が成立しなかった。この場合の一般的対処法としてバンドル調整法があ

る。本ソフトウェアの地上写真バンドル調整法では、左右写真それぞれの撮影点および視準点の空間座標値をあらかじめ準備しておき、バンドル調整の計算中に用いる。しかも、その座標系として、奥行きにY軸、横方向にX軸、高さにZ軸を取るようになっている。よって、基準点座標系もこれと同一にせねばならない（第15図Aを参照）。しかし、この座標系で標定計算を行った場合、見上げ撮影を行った本実験のほとんどで、バンドル調整の

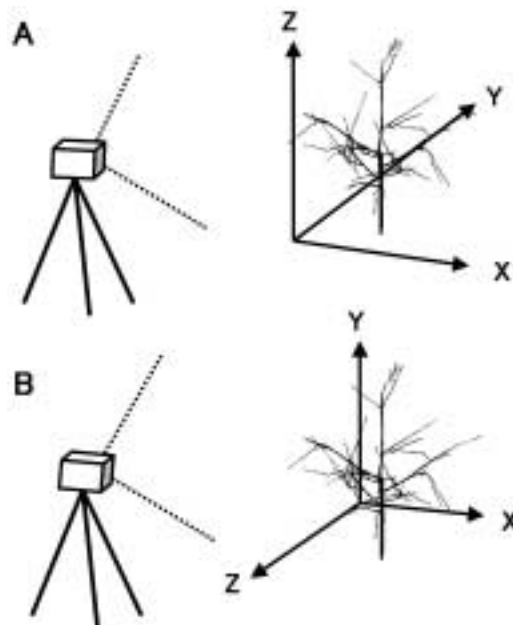


Fig. 15. Two kinds of coordinate system in photogrammetry. A is the terrestrial photogrammetry, and B is a same as the aerial photogrammetry.

計算が収束しなかった。当初、この原因として、バンドル調整計算における未収束現象と思われたが、その後、上記座標系の基準点データを用いた単モデル標定計算を行っても、ほとんど収束しなかった。たとえば、実験4における実験圃場アウトウ成木合計24組の立体写真のうち、単モデル法標定計算が成功したのは、C樹の35mmレンズ写真と24mmレンズ写真の2組のみで、このほかに標定計算の内部エラーが3組あり、残りの19組については標定計算が収束しなかった。また、この原因については十分明らかにできなかった。よって、本実験対象（樹高が大きいもの）のように見上げ撮影では、上記座標系の標定計算は単モデル法でも困難になると判断した。この座標系と異なり、正対撮影（空中撮影とも言う）を採用した場合（第15図B）、すなわち、樹体の横方向をX軸、高さをY軸、奥行きをZ軸とした基準点座標系では、標定計算は100%成功した。おそらく、撮影方法自体は斜め上撮影であっても、第15図Bの座標系を採用すれば空中撮影と同じ格好になるからであろう。この場合には空中写真用のバンドル調整法が可能と思われたが、本ソフトウェアにはそのためのファイルが具備されていないかった。

上記結果に加え、仮にバンドル調整法が可能であっても、単モデル法に比較して収束条件が厳しく、かつ、撮影以外に現場での煩雑な計測を要することから、本実験ではバンドル調整の実施を途中で打ち切り、この代わりに正対撮影したもので単モデル法の標定計算を行う場合の1つの補正法を考案した。9組の立体写真測量（実験3）における各標定計算結果（7つの基準点の実測値と計算値のデータ）から、X、YおよびZ座標値の計算値を説明変数とする実測値の一次回帰式と平均誤差を算出した（第4表）。その結果、X座標とY座標についてはいずれの回帰式の勾配は1に極めて近く、切片も0に極めて近かった。また、寄与率（ R^2 ）はいずれも0.99以上で、平均誤差はほとんどが1cm前後であった。これに対し、Z座標の勾配は1.3前後で、切片は0とは大きく離れており、平均誤差も大きかった。しかし、 R^2 はほとんどが0.99以上であった。上記のように平面精度はほぼ満たされたことから、奥行き精度のみを補正すべく、個々の写真組における一次回帰式を用いて、計測点（荷札取り付け部位）のZ座標をそれぞれの写真組で補正したところ、第12図Cに比較してZ座標の計算値と実測値の間の1:1性が大幅に改善され（第16図）、平面

Table 4. The regression equations of the measured coordinate values of X, Y and Z (MX, MY and MZ in cm) using their calculated coordinate values (CX, CY and CZ in cm) of the seven control points and its mean error of each set of the photographing.

Set no. of photographing	X coordinate			Y coordinate			Z coordinate		
	Equation for MX by CX	R^2	ME ^Z (cm)	Equation for MY by CY	R^2	ME(cm)	Equation for MZ by CZ	R^2	ME(cm)
1	$MX = 0.9976CX + 0.1173$	0.9985	1.41	$MY = 1.0026CY - 0.1675$	0.9984	1.32	$MZ = 1.3677CZ + 18.161$	0.9994	7.86
2	$MX = 0.9898CX + 0.5024$	0.9958	2.08	$MY = 1.0115CY - 0.7434$	0.9956	1.98	$MZ = 1.3142CZ + 15.515$	0.9992	6.99
3	$MX = 0.9976CX + 0.1192$	0.9979	1.59	$MY = 1.0026CY - 0.1708$	0.9986	1.33	$MZ = 1.2633CZ + 13.002$	0.9990	6.39
4	$MX = 1.0033CX - 0.1372$	0.9937	2.66	$MY = 0.9961CY + 0.2841$	0.9910	2.69	$MZ = 1.2351CZ + 9.700$	0.9688	8.07
5	$MX = 0.9875CX + 0.6159$	0.9975	1.66	$MY = 1.0142CY - 0.9206$	0.9974	1.50	$MZ = 1.3384CZ + 16.712$	0.9987	7.56
6	$MX = 1.0015CX - 0.0731$	0.9991	1.07	$MY = 0.9984CY + 0.1024$	0.9985	1.21	$MZ = 1.3771CZ + 18.728$	0.9969	7.68
7	$MX = 1.0031CX - 0.1541$	0.9992	0.95	$MY = 0.9967CY + 0.2153$	0.9989	1.01	$MZ = 1.3742CZ + 18.478$	0.9993	7.98
8	$MX = 1.0031CX - 0.1542$	0.9990	1.18	$MY = 0.9967CY + 0.2159$	0.9987	1.08	$MZ = 1.2812CZ + 13.888$	0.9989	6.58
9	$MX = 0.9918CX + 0.4034$	0.9968	1.86	$MY = 1.0091CY - 0.5910$	0.9985	1.07	$MZ = 1.3932CZ + 19.409$	0.9990	8.23
All sets			1.61			1.46			7.48

^z Mean errors between the measured coordinates and the calculated ones of the seven control point in the each set of photographing.

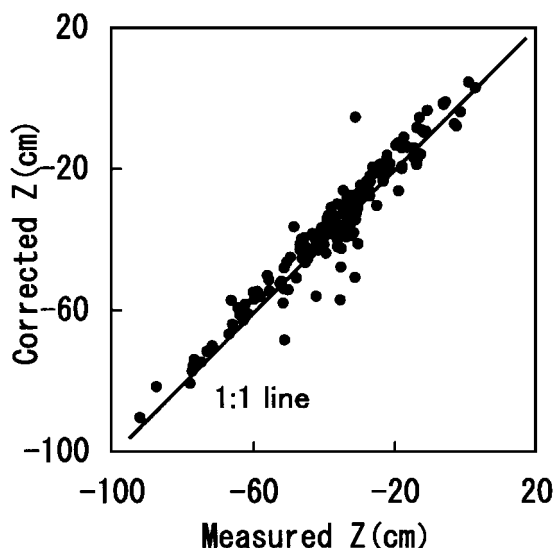


Fig. 16. Relations between the measured values of Z coordinate and the calculated values by a simple correction method.

精度の基線比倍の誤差(第2式)だけを有すると思われる散布図に変わった。これらの補正式における勾配や切片の値は撮影条件、撮影対象、使用レンズなどで決まる個々の立体写真組に特有な性格をもつため、立体写真組ごとに入手せねばならない。その入手方法は極めて容易であった。すなわち、標定計算結果中の基準点の計算値と実測値(本ソフトウェアのマニュアル内ではそれぞれ改算値と標準値と称している)をコピーし、Excel ファイルに貼り付ければ一回帰式を容易に入手できる。要するに、補正のためのデータ入手実験を新たに必要としない。本ソフトウェアのパソコン画面上での三次元座標値直読機能は損なわれたものの、エクスポートデータを二次加工するほとんどの利用面では、そのためのプログラムにわずか1行の変換式を追加するだけでよいので、総じて簡易な補正法といえよう。以下、この補正法を簡易補正法とよぶ。

6. 枝形図および樹形図の作図結果

第4図Aの太枝の立体写真測量値を用いた枝形図を第7図A～Cに示した。第7図Aはカメラ側から見たもの、いわゆる、正面図であり、平面精度が良好なため単モデルのみの場合でも実物と良く対応していた。第7図BとCはカメラとは直角方向からみた側面図であり、単モデル法のみ(第7図B)に比べ、5.に記した簡易補正を

行った場合(第7図C)には、奥行き幅が少し増大したのがわかる。室内に持ち込んだ6年生の枯れ樹(第7図D)の単モデル法のみによる測量結果を用いた正面図と上面図を、それぞれ、第7図EおよびFに示した。これよりも大きい樹(第7図GおよびJ)を対象にした場合、単モデル法のみでは、正面図は良好であったものの(第7図HおよびK)、徒手撮影、奥行き誤差およびZ座標値の1:1性の悪さなどが原因してか、側面図は良好でなかった(第7図IおよびL)。

7. 撮影距離およびレンズ焦点距離が成木の樹形計測結果に及ぼす影響

上記5.の簡易補正法を用いた結果は同一レンズ焦点距離およびほぼ同一の撮影距離で、撮影対象がほぼ同じサイズの場合に得られたものであった(実験3)。そこで、数段階の異なる焦点距離のレンズを使用して、サイズの異なる樹体を立体写真測量する場合にも(実験4)、上記の簡易補正法が適用できるかどうか調査した。

その結果、8mm(魚眼レンズ)を除く、残り全てのレンズとすべての樹サイズで、X座標とY座標の回帰式の勾配は1に極めて近く、また、切片は0に極めて近く、 R^2 はいずれも0.99以上であった(第5表)。平均誤差はほとんどが数cmであったが(第5表)、平均誤差の違いには撮影距離(PHD)とレンズの焦点距離が影響したものと考えられる。焦点距離8mmの魚眼レンズの場合には、平均誤差は大きくなった(第5表)。

一方、Z座標の回帰式の勾配はX座標とY座標の場合に比べて1から離れるものも多く見られた(第5表)。しかし、 R^2 は魚眼レンズを除くいずれの場合も0.99付近であった。したがって、5.に記したものと同様に、これらの一回帰式を用いてZ座標を補正できるものと考えられた。また、8mm魚眼レンズを除けば、これらの回帰式で補正したZ座標値の平均誤差の多くは大きく減少した(第5表右端)。

なお、魚眼レンズ写真の標定計算は取り込み解像度が2400 dpiの場合にはいずれも成功しなかったが、解像度を下げることで成功した(第5表)。したがって、魚眼レンズを用いると広角レンズに比べ、撮影距離を著しく短縮でき、立体写真測量そのものも可能と考えられるが、この場合の誤差は無視できないほど大きいと思われる。

上記のように、簡易補正がこの場合にも可能であった

Table 5. The regression equations of measured coordinate values of X, Y and Z (MX, MY and MZ in cm) using their calculated coordinate values (CX, CY and CZ in cm) of the seven control points and its mean error in cm of each combinations with the tree size and the lense having different focal length. The photographing horizontal distance (PHD) indicates the minimum distance which could photograph the each size of tree.

Tree	Focal length (mm)	Reso- lution (dpi)	PHD (cm)	X coordinate			Y coordinate			Z coordinate			ME of corrected	
				Equation for MX by CX	R ²	ME ^z (cm)	Equation for MY by CY	R ²	ME (cm)	Equation for MZ by CZ	R ²	ME (cm)	Z (cm)	ME (cm)
A ^y	35	2400	710	MX=1.0187CX-0.0152	0.9977	3.9	MY=0.9903CY+0.7026	0.9994	3.0	MZ=1.0633CZ+0.2034	0.9971	3.2	2.2	3.2
A	28	2400	587	MX=1.0182CX-0.0147	0.9975	4.1	MY=0.9905CY+0.6861	0.9986	4.0	MZ=0.8203CZ-0.5777	0.9941	10.6	3.5	10.6
A	24	2400	480	MX=1.0092CX-0.0074	0.9979	3.5	MY=0.9951CY+0.3548	0.9974	4.9	MZ=1.1415CZ+0.4548	0.9940	6.2	3.7	6.2
A	18	2400	385	MX=1.0156CX-0.0128	0.9979	3.6	MY=0.9918CY+0.5927	0.9995	2.2	MZ=0.9722CZ-0.0893	0.9935	4.0	3.6	4.0
A	8	1800	155	MX=-0.9182CX+0.0360	0.9976	6.9	MY=1.0658CY-4.7534	0.9206	24.7	MZ=1.3358CZ+1.0737	0.6006	32.5	33.8	32.5
B ^x	35	2400	715	MX=1.0132CX-0.0105	0.9976	3.1	MY=0.9931CY+0.5065	0.9974	5.1	MZ=1.1592CZ+0.5118	0.9935	6.0	3.7	6.0
B	28	2400	578	MX=1.0143CX-0.0116	0.9970	3.5	MY=0.9925CY+0.5454	0.9981	4.4	MZ=1.0811CZ+0.2608	0.9934	5.2	3.8	5.2
B	24	2400	490	MX=1.0301CX-0.0244	0.9982	3.9	MY=0.9849CY+1.0926	0.9990	3.4	MZ=0.9601CZ-0.1281	0.9957	3.0	2.6	3.0
B	18	2400	390	MX=1.0149CX-0.0121	0.9962	4.1	MY=0.9922CY+0.5647	0.9980	4.5	MZ=1.1178CZ+0.3785	0.9977	4.6	1.9	4.6
B	8	1800	168	MX=1.0354CX-0.0320	0.9919	7.4	MY=0.9763CY+1.1408	0.9756	14.5	MZ=1.1113CZ-1.6174	0.8165	16.5	16.6	16.5
C ^w	35	2400	407	MX=-0.9578CX+0.0314	0.9983	2.5	MY=1.0286CY-0.3528	0.9983	2.3	MZ=1.0229CZ-0.0233	0.9912	2.6	2.6	2.6
C	24	2400	295	MX=-0.9546CX+0.0338	0.9981	2.5	MY=1.0311CY-0.3836	0.9977	2.7	MZ=1.0912CZ-0.0922	0.9900	3.3	2.9	3.3
C	18	2400	215	MX=-0.9604CX+0.0296	0.9964	2.9	MY=1.0265CY-0.3274	0.9985	2.3	MZ=1.1845CZ-0.1870	0.9979	4.0	1.1	4.0
C	8	1800	125	MX=-0.9961CX+0.0031	0.9944	3.0	MY=1.0032CY+0.0016	0.9996	0.8	MZ=1.2052CZ-2.2335	0.8737	8.4	8.2	8.4
D ^v	35	2400	618	MX=-0.9652CX+0.0290	0.9994	1.9	MY=1.0321CY+0.0162	0.9984	2.0	MZ=1.1545CZ-1.6809	0.9671	4.9	3.8	4.9
D	28	2400	400	MX=-0.9545CX+0.0340	0.9982	2.6	MY=1.0312CY-0.3853	0.9976	2.6	MZ=1.1044CZ-0.1060	0.9946	3.1	1.6	3.1
D	24	2400	392	MX=-0.9514CX+0.0360	0.9947	3.4	MY=1.0335CY-0.4136	0.9987	2.5	MZ=1.1043CZ-0.0444	0.9953	1.9	1.6	1.9
D	18	2400	297	MX=-0.9572CX+0.0319	0.9983	2.5	MY=1.0291CY-0.3580	0.9986	2.1	MZ=1.2592CZ-0.2630	0.9964	5.5	1.6	5.5
D	8	1800	125	MX=-0.9569CX+0.0319	0.9952	3.4	MY=1.0301CY-0.3698	0.9736	7.8	MZ=1.4371CZ-0.4434	0.9589	9.3	6.1	9.3
E ^u	35	2400	490	MX=-0.9556CX+0.0330	0.9985	2.4	MY=1.0303CY-0.3741	0.9986	2.4	MZ=0.9771CZ+0.0233	0.9921	2.4	2.4	2.4
E	28	2400	390	MX=-0.9589CX+0.0305	0.9996	1.7	MY=1.0277CY-0.3424	0.9983	2.2	MZ=1.0221CZ-0.0224	0.9953	2.0	2.1	2.0
E	24	2400	296	MX=-0.9586CX+0.0309	0.9996	1.8	MY=1.0281CY-0.3456	0.9986	2.2	MZ=0.9859CZ+0.0143	0.9885	2.6	2.6	2.6
E	18	2400	236	MX=-0.9578CX+0.0313	0.9991	2.1	MY=1.0286CY-0.3524	0.9989	2.2	MZ=1.0612CZ-0.0623	0.9947	2.4	1.8	2.4
E	8	1200	105	MX=-0.9809CX+0.0158	0.9955	2.9	MY=1.0165CY+0.0081	0.9957	3.1	MZ=1.1281CZ-1.3937	0.7074	12.1	12.5	12.1

^z Mean error between the measured coordinates and the calculated ones of the seven control points of the each photographing.

^y 330 cm in height and 360 cm in width.

^x 430 cm in height and 360 cm in width.

^w 220 cm in height and 250 cm in width.

^v 330 cm in height and 170 cm in width.

^u 260 cm in height and 270 cm in width.

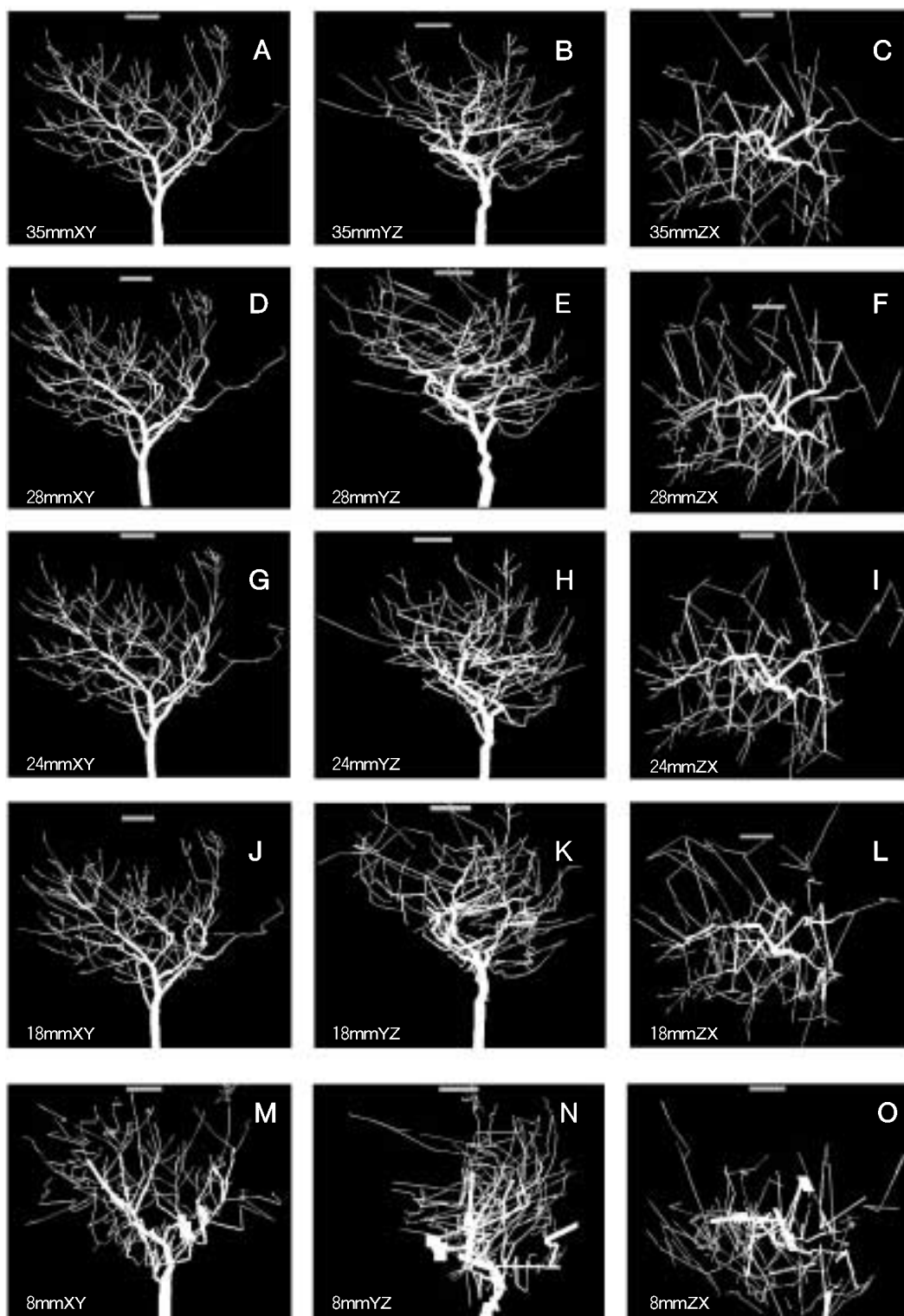


Fig. 17.

Fig.17. Tree form figures from the stereo photogrammetry of a tree(A tree as shown in Fig. 8)using the five lenses having different focal length in Experiment 5. The left, middle and right row indicates the front view, the side view and the top view, respectively, in each of the lens. A horizontal bar in each figure indicates 50 cm.

ことから、A 樹（第 8 図 A）に限り、5 種類のレンズで撮影した左右写真組に A 樹の 5 組の補正式パラメータ（第 5 表）を用いて、それぞれ簡易補正を加味した立体写真測量を行った。さらに、測量結果を用いて樹形図を作図した（第 17 図）。ただし、新梢のうち、長さが数 cm に満たない短果枝（spur）は数が相当多いため、この場合の立体写真測量の対象外とした。第 8 図の B と F は同一樹を異なるレンズで撮影したときの写真である。焦点距離 8 mm の魚眼レンズで撮影した写真（第 8 図 F）は円形画像のため、画像の歪み、他のレンズの場合に比べてフィルムに占める被写体の割合が小さいこと、カメラからの遠近の違いが写真画像上に極端に現れるなどの特長を有し、パソコン画面での測量作業に困難を伴うことが多かった。とりわけ、カメラから遠い所にある枝の印影は小さく、かつ、色が薄く写るので正確に測量出来なかった。このためか、魚眼レンズ写真の測量データを用いた樹形の作図結果（第 17 図 M ～ O）には、樹形の大きな乱れと枝の太さの異常値が生じた。他の 4 種の広角レンズ写真による測量データを用いた樹形の作図結果は総じて良好であった（第 17 図 A ～ L）。第 17 図の左列（A, D, G および J）は XY 座標値を用いた正面図であるため、良好な平面精度を反映してか枝の乱れは少なかった。第 17 図中央列（B, E, H および K）は YZ 座標値を用いた側面図であり、第 17 図右列（C, F, I および L）は ZX 座標値を用いた上面図であるため、いずれも奥行き精度（Z 座標精度）の影響を受けて枝の乱れが散見された。加えて、4 種のレンズの画角や撮影距離が互

いに相当違うため、同一の被写体（A 樹）とはいえ、死角発生の違いも含め、撮影した写真そのものは互いに大きく異なった。また、撮影場所を変えるたびに、地面の起伏のためか、三脚の姿勢も微妙に変化するなど撮影の良否を伴った。さらに、写真組ごと標定解析を行ったので、個々の標定解析結果の良否による影響を伴った。よって、4 種のレンズからの作図結果には、上記の立体写真測量法に特有な不可避の誤差による影響が現れたものと考えられる。

各枝中心軸の三次元座標や直径を用いて算出した枝の総体積、総長および総本数の 3 項目値を 5 種のレンズの立体写真測量間で比較すると（第 6 表）、8 mm 魚眼レンズの場合を除いて、他の 4 種のレンズ間で 3 項目値ともほぼ似通った（第 6 表）。この場合、実測値が無かったので、4 種のレンズからの平均値に対する相対値（%）で比較したが、4 種のレンズ間では 3 項目値とも総じて数%の違いであったのに対し、上記平均値に対する 8 mm 魚眼レンズからの相対値は大きく離れた（第 6 表）。

8. 立体写真測量法からのエクスポートデータの取り扱いおよび応用プログラム例

果樹を対象にする立体写真測量結果の利用場面は多岐にわたるため、各ユーザが独自に作成したプログラム計算に委ねるしかない。ここでは、筆者らが作成したプログラムを題材に、エクスポートデータの取り扱い上の注意を列挙したい。第 18 図は本研究に使用した樹形、枝体積、樹冠解析結果などを出力するための自作プログラム

Table 6. Comparisons of the total volume, length and number of branches between the five stereo photogrammetries using the five lenses, where the all visible branches except the spurs were measured from the photographs.

Focal length of lens (mm)	Total volume of branches (TVB) (cm3)	Relative value to the mean TVB ^z (%)	Total length of branches (TLB) (cm)	Relative value to the mean TLB ^z (%)	Total number of branches (TNB)	Relative value to the mean TNB ^z (%)
35	31939	101.2	8773	95.1	171	100.9
28	34222	100.5	9954	107.9	166	97.9
24	29506	93.5	8920	96.7	171	100.8
18	30497	96.6	9241	100.2	170	100.2
8	47214	149.6	9986	108.2	154	90.8

^z Mean value of the four results of stereo photogrammetries using the four lenses (35, 28, 24 and 18 mm in focal length)

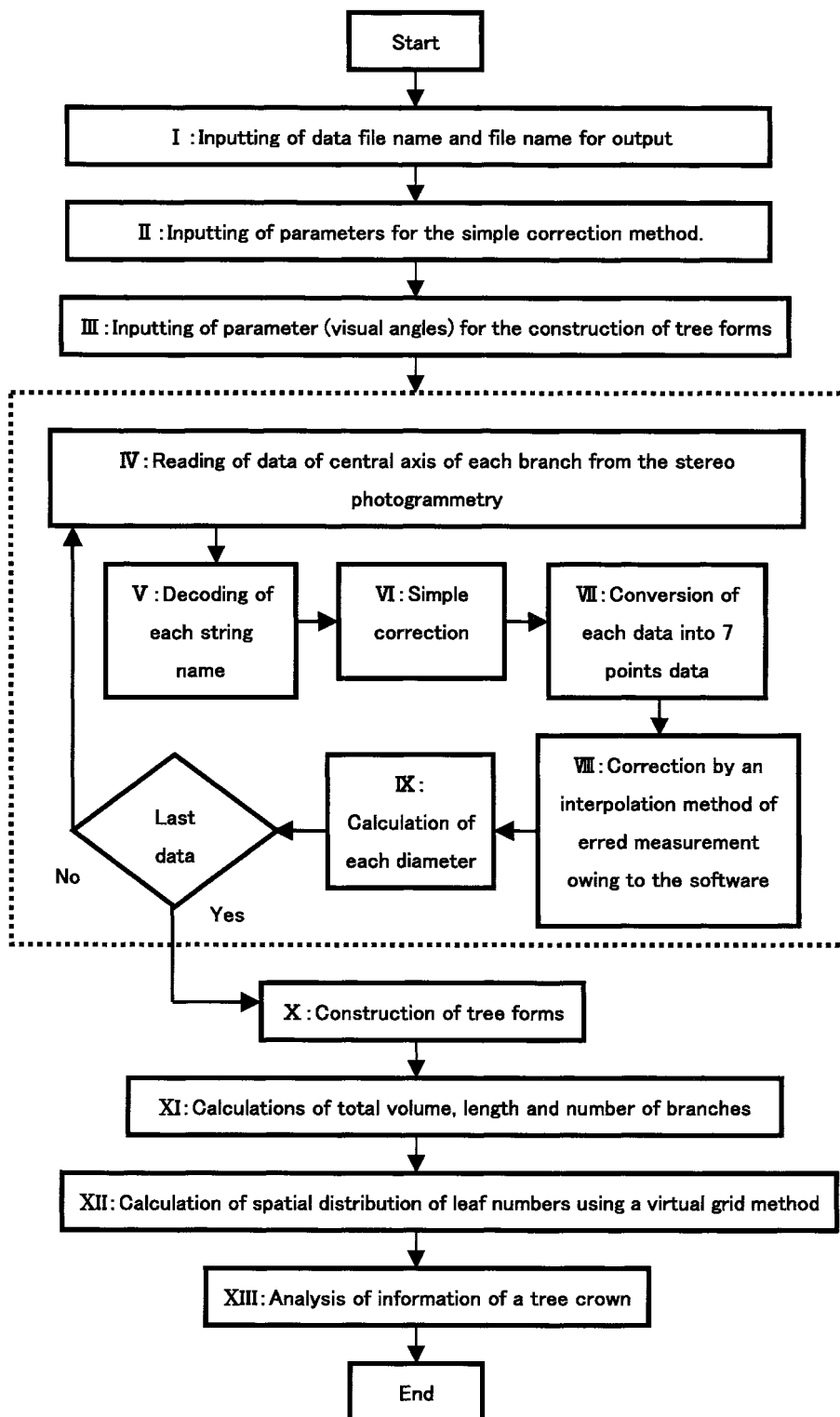


Fig. 18. A flow chart of an utility program which uses exporting data from the software for stereo photogrammetry.

のフローチャートである。ストリング計測によるエクスポートデータの1行はストリング名(読み取り点番号も含む)、X座標値、Y座標値およびZ座標値の並びからなる。1本の枝について、最初の数行(通常4行以上14行以下)は枝中心軸用であり、最後から4～3行は基部直径および最後から2～1行は先端部直径用である。この行並びが枝数だけ集積してできるエクスポート全データのファイル(入力ファイル)の名前、簡易補正用の式パラメータおよび樹形作図の視角(3軸に対する回転角度)を最初に入力する(第18図のⅠ、ⅡおよびⅢ)。

エクスポートデータ1行を読み出すたびに、ストリング名の解釈(枝齢、枝番号、読み取り点番号など)と座標値の簡易補正を行う(第18図のⅤおよびⅥ)。1枝分についてこれを繰り返した後に、枝中心軸上7点の三次元座標値に変換する(第18図Ⅶ)。これは後の一括的な

枝の作図サブルーチンプログラムの便宜を図ったものである。この場合、ストリングの点数が7点以上の場合は適度に間引き、不足する場合は内挿法で補う。

次に、これまで説明しなかった本ソフトウェア特有な誤計測への対処ステップ(第18図Ⅷ)に進む。果樹の写真のように多くの枝が交錯して写っている場合、左写真(第19図A)に写った奥の枝(計測対象枝)のストリングを引く際、誤って前の枝の上に読み取り点を置くと、右写真(第19図B)では撮影角度の違いから明らかに屈曲して見える。この異常な屈曲により前の枝を経由してストリングが引かれたこと(以下、誤計測)にパソコン画面上で気付く。通常、気付いた誤計測のストリングを削除し、計測し直せば良い。つまり、第19図Cのように前の枝を避けて後ろの枝の上に読み取り点を置けば正常な計測になる(第19図D)。しかし、枝の込み合い程度、

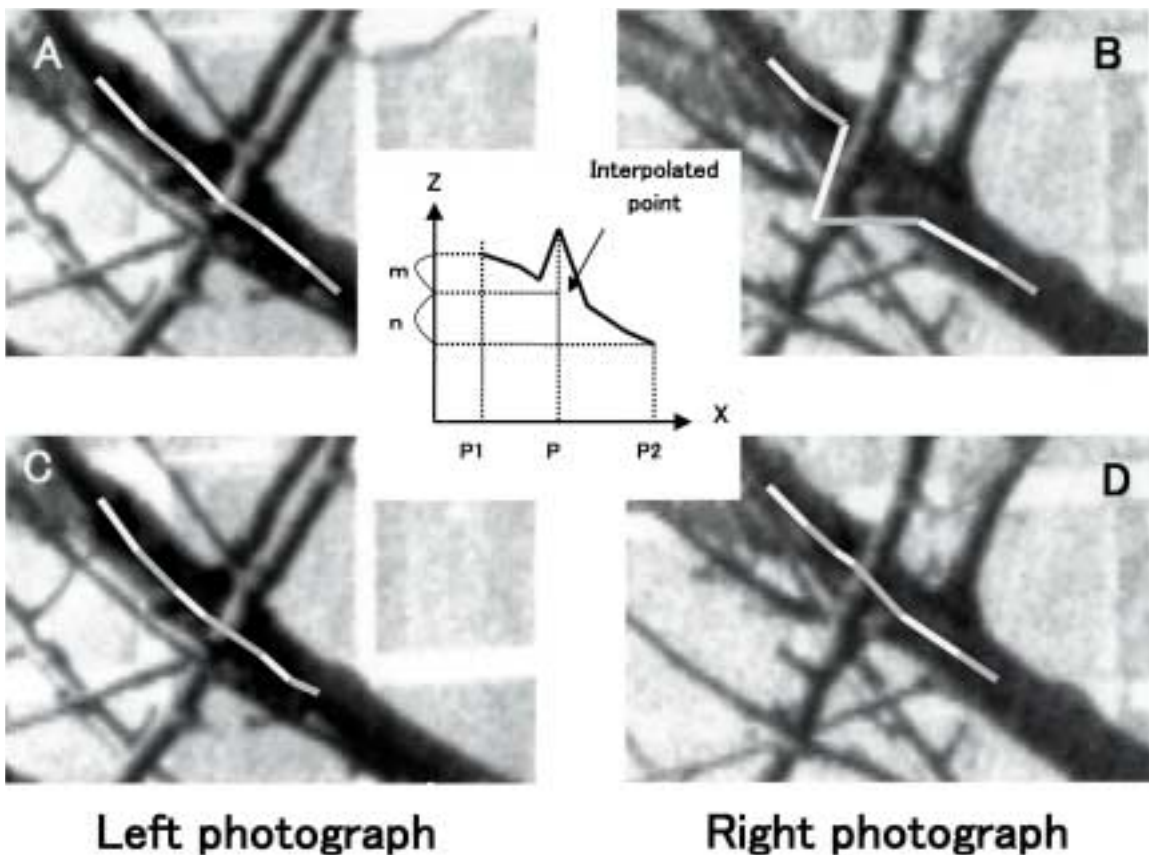


Fig. 19. An erred measurement which is easy to arise in cases of crowded branches(A and B). An elaborate method of drawing a string for avoiding the erred measurement(C and D). The principle of an automatic calibration-interpolation of an erred coordinate in the utility program(the insertion of the figure)

基線比, 画角などによっては誤計測すべてをパソコン画面上で気付くことが困難な場合もある。そこで, 誤計測の有無を自動検出し, 検出された誤計測を自動的に補正する処理を行う(第18図Ⅷ)。第19図AおよびBに示したように, 誤計測点のX座標とY座標は正常だが, Z座標が別の枝のZ座標になるので, 以下の独自な方法で誤計測を自動検出する。第19図内挿入図に示したように, この枝のZX平面への投影線を考えるとともに, 枝の両端点を結ぶ直線のZX平面への投影線の長さを L とする。両端点にはさまれた途中の点の一つ一つについて, ZX平面への投影点位置を計算する。この点と上記直線との間の直線距離(D)を計算し, 投影線の長さ(L)との大小を比較する。通常, 1本の枝は直線状であるが, 地軸方向に湾曲するものがある。よって, XY平面やYZ平面への投影図には湾曲が見られる。しかし, ZX平面への投影線が急に屈曲することは, 誘引などの人工的処理が無ければ, 極めて稀である。そこで, 一定の係数 K ($0 < K < 1$)を設定したうえで, $D > KL$ になった場合, 誤計測と見なす(自動検出)。この場合の K の値は1本の枝の長さから考えて0.1あるいは0.2程度で良いだろう。次に, 自動検出された枝に限り, 以下に示す内挿法で誤計測点のZ座標値を自動補正する。この枝をX座標軸上へ投影し(第19図内挿入図の横軸を参照), 両端点からの投影点から誤計測点の投影点までの線分比($PIP:PP2=m:n$)を求め, この線分比でZ座標値を内挿する(第19図内の挿入図の縦軸を参照)。

ストリング計測方法をあらかじめ両端指定に設定したうえで, ユーザが画面上で正確に指定すれば, 両端点については誤計測が起きない。

第19図に示した例は誤計測の発生原因の主たるものであるが, これ以外の原因, たとえば, 左写真で指定した点が右写真では死角にあるときにも発生する。両端点に挟まれた読み取り点は本ソフトウェアが計算処理するが, 上記の死角の場合には本ソフトウェア独自の判断アルゴリズムが作動するらしい。結果として誤計測されるものも多いが, パソコン画面で気が付くので, その場での計測のやり直しが可能である。しかし, ケアレスミスで見逃した場合にも, 上記の誤計測の自動検出・自動補正の機能によりその多くが修正可能であろう。ただし, 左写真内の1枝が死角にあれば, 計測漏れを引き起こすなど完全な補正は不可能であろう。

上記の一連の処理を全枝について繰り返し, 全ての補

正後の枝データを保存しておけば, これを用いて, 以降の樹形の作図(第18図X), 枝の総体積・総長・本数などの計算(第18図XI)あるいは仮想グリッドと各枝の三次元座標データとを交錯させることによる葉量の三次元分布データへの変換ステップ(第18図XII)に進むことができる。保存された枝データや葉量の三次元分布データは次の樹冠解析のステップ(第18図XIII)に用いられ, 多くの樹冠情報を出力する。なお, X以降のステップである樹形の作図, 枝の総体積などの計算, 葉量の三次元分布データへの変換および多数項目にわたる樹冠解析のプログラムについては既報のプログラムから移植したもののばかりなので, これらの詳細については既報を参照されたい(山本・山口, 1989; 山本・伊藤, 1996; 山本ら, 2004)。

9. 果樹の立体写真測量法の実際的方法(まとめ)

本実験結果を総括し, 果樹を対象にする実際的な立体写真測量法を列挙したい。樹体全体の立体写真測量法の場合と違って枝の形状・姿勢などの数量的データ入手を目的とした立体写真測量では, 焦点距離 35 mm のレンズと三脚を用いて比較的近距离から枝群をやや上向きに撮影するのが良い。アクリル樹脂製パイプで作製した小型(携帯用)単軸型基準点セットを吊るし, 中心部の1個の標識を視準点にする。後ろが天空になるのでバックを必要としない, この場合, 写真画像の取り込み解像度を 2400 dpi 以上にし, 単モデル法に簡易補正法を加味した標定を行うと非常に精度が良くなり, 細い枝の直径の計測も十分可能である。樹全体を対象にする立体写真測量法の場合, 対象園地の栽植様式や栽植距離, 樹高および樹幅を調査したうえで, 最初に撮影計画を立てる。第1表と第2表を参考に, 縦撮り・横撮りの選択やPHD(撮影距離)の計算をふまえ, レンズの焦点距離を選択する。フックを取り付けたエレクトパイプを数本立て, 樹の後側に2枚に折りたたんだ防電網を設置し, 三脚を用いて枝群をやや上向きに撮影するのが良い。これまでの経験から, 果樹園には起伏や段差が意外に多く存在し, 撮影の際, 三脚を地面に直接置くよりも, 厚ベニヤ板の上に三脚を置き, その上で三脚を左右にずらすことが標定精度を上げるのに非常に有効であることがわかった。この場合, 厚ベニヤ板が必ずしも厳密に水平であることを要しない。樹のサイズに合った大きさのアルミアングル製の単軸型基準点セットを樹中心部に立て, 中

心部の1個の標識を視準点にする。この場合、写真画像の取り込み解像度は可能な範囲で最も大きいものを使用し、単モデル法でまず標定し、簡易補正式を入手してから測量を開始する。枝が混み合う部分では8.に記した誤計測が起き易いので、左右写真のストリングを見比べながら、誤計測を出来るだけ少なくする。さらに、8.に記した誤計測の自動検出・自動補正を具備したプログラム計算が望ましい。エクスポートデータを以後の作業に使用する段階で上記補正式を用いて補正する。樹形図を作図する場合、遠くに写る細い枝の直径の計測が不十分な場合には、新梢に限り代表的な直径値を用いる。低廉化のため、市販カメラ（非測量用1眼レフカメラ）と一定の範囲の広角レンズを準備する。魚眼レンズの使用は撮影距離が十分取れない場合以外は使用しない。取り込み解像度はパソコンの記憶容量・計算速度の許す範囲でできるだけ大きいことが望ましい。デジタルカメラは指標の計測やフィルム現像が不要であるなどの利点も多いが、筆者らは市販のアナログカメラを推奨したい。一般の立体写真測量と違って、細い枝の測量のためにはできるだけ解像度が大きいことが望ましいからである。たとえば、約610万画素の大型 CCD (23.7 mm×15.6 mm) を有する高価なデジタルカメラに比べて、フィルム画像を2400 dpi で取り込んだ場合は約768万画素、3600 dpi で取り込んだ場合は約1152万画素の画像に匹敵できる。また、大画素数のデジタルカメラ撮影画像の保存にはフラッシュカードやハードディスクを多く消費するのに比べ、低廉の白黒フィルムには安全、かつ、ほぼ永久的に画像を保存できる利点がある。パソコンおよび周辺装置については、周波数の大きいパソコンと21インチクラスの高解像度ディスプレイ (SXGA 以上で、できるならば1600ドット×1200ラインが望ましい) が必要である。多数の画像ファイルを扱うので、画像ファイルの取り込みや保存のため、画像取り込みソフト、フィルムスキャナ、磁気ディスクなどが必要である。

空中写真などの樹形に比べ、立体写真測量結果から作図した樹形図は誤差を含むため見劣りがする。しかし、単なる果樹の写真や実物を前にしたいいわゆる「達観」に比較して、立体写真測量からは膨大な量の樹冠情報（科学的データ）を入手することができ、緒言に記した目的を達成できるものと考えられる。なお、本研究には実験材料にオウトウを用いたが、立体写真測量の性格から見て、ここに記した実験結果はオウトウに限定したもので

はなく、全ての落葉果樹に当てはまるものと考えられる。

おわりに

途中多くの挫折を経験しながら研究を進めて約5年、立体写真測量法を用いた果樹測量がやっと可能になったと感じている。この利用者は今後増えることが予想されるが、本研究が果樹への初めての試みであり、果樹用の立体写真測量マニュアルなるものはいまだ存在しない。そこで、本報告はこれまでの試行錯誤からの教訓も含め、果樹の立体写真測量に必須な要件や限界などを記録し、新たな利用者が同じ試行錯誤を繰り返さないための便宜をはかったつもりである。

摘 要

立体写真測量法による果樹測量の可能性を検討するために以下の実験を行った。

1. 果樹サイズ、レンズの焦点距離、画像の取り込み解像度、最も大きくとれる撮影距離などを組み合わせ、デジタル画像を用いる立体写真の平面精度と奥行き精度を計算した。その結果、樹冠の全範囲にわたり、平面誤差は数 mm 程度であり、奥行き精度は悪くても数十 mm であった。

2. 種々のサイズの果樹を最も密植にした場合の撮影可能な距離と上記計算結果 (1.) とを用いて、使用可能なレンズの焦点距離の範囲を明らかにした。

3. 果樹に対応した撮影方法、バック設置方法、基準点の設定方法および標定計算方法を検討した。その結果、標準三脚を使用した見上げ撮影、果樹用防電網を2枚に重ねにしたバックおよび単軸型の携帯用基準点セットが有効であった。また、見上げ撮影の写真を空中写真と同じ座標系に置いた場合、標定計算は100%成功した。

4. 計測誤差を検討した結果、単モデル法の場合でも、X座標とY座標の計測は正確であった。Z座標の大きな誤差が見出され、計算値と実測値の間の1:1性が明らかに成立しなかった。Z座標の補正法として、基準点データ計算値による実測値の推定式（一次回帰式）を用いてZ座標を補正する方法が有効であった。

5. 樹の一部（枝群）の立体写真測量値から算出した枝の形状・姿勢の各項目値および枝群の総体積はそれぞれの実測値に対してほぼ1:1の関係が推察された。

6. 大きさの異なる5本の成木を対象に焦点距離の異なる

る5種類のレンズを用いて立体写真測量を実施したところ、Z座標の簡易補正を施すことで、魚眼レンズを除く多くのレンズで計測誤差が減少した。

引用文献

- Kikuchi, T. (1974) Growth and structure of the shoot system of apple trees as characterized by the frequency distribution of shoot lengths. *Bull. Fac. Agri. Hiro-saki Univ.* 23: 27-59.
- 日本写真測量学会・解析写真測量委員会 (1989) 解析写真測量. 村井俊治編. 日本写真測量学会. 東京.
- 小倉金之助・矢野健太郎 (1983) 基礎数学ハンドブック. 森北出版. 東京.
- 塩崎雄之輔・荒川 修・菊池卓郎 (1995) マルバカイドウ台リンゴ‘ふじ’弘大方式半密植主幹形樹の樹冠内光条件と果実分布. *園学雑*, 63: 711-718.
- Smith, G. S., J. P. Curtis, and C. M. Edwards (1992) A method for analyzing architecture as it relates to fruit quality using three-dimensional computer graphics. *Ann. Bot.* 70: 265-269.
- 瀧下文孝・福田博之・千葉和彦・工藤和典 (1995) コンピューター・グラフィックスを利用したリンゴの樹形・光透過・果実品質の解析. *果樹試験場報告* 27: 43-64.
- 山本隆儀・伊藤博祐 (1996) 広角レンズを用いた直角2側面写真による密植わい性リンゴ樹の樹形・葉群構造の計測. *園学雑*, 64: 729-739.
- 山本隆儀・宮田裕美・野口マキ・奥山定治 (2004) 樹冠情報の長期予測を目的とした果樹の樹形構築解析システム(CACOAS)の開発. *山形大学紀要（農学）* 14: 59-93.
- 山本隆儀・山口恵理 (1989) 果樹の樹形・葉群構造の簡易解析システム—二側面写真画像を用いた新システムの開発—. *山形大学紀要（農学）* 10: 869-901.